

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Pulzní usměrňovač pro nabíjení akumulátorů
Pulse Rectifier for accumulator charger

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, 2. května 2011

.....
Bc. Lubomír Martiniak

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za vedení diplomové práce, za cenné rady a doporučení. Také bych rád poděkoval Ing. Martinovi Sobekovi za pomoc a doporučení při programování signálového procesoru, Ing. Jakubovi Jirkovi za neocenitelné rady, doktorandům katedry elektroniky a samozřejmě rodině a známým, kteří mně jakýmkoliv způsobem nesměřovali při tvorbě této diplomové práce.

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o problematice nabíjení akumulátorů pomocí pulzního usměrňovače. Cílem práce je návrh a aplikace řídicího algoritmu pro pulzní usměrňovač. Na jedné straně řeší algoritmy pro řízení samotného pulzního usměrňovače, a na straně druhé podřazené algoritmy vhodné pro samotné nabíjení akumulátorů. Realizační výstup diplomové práce bude sloužit mimo jiné jako málo výkonový model pro nabíjení akumulátorů trakčních pohonů. Práce sleduje obecný popis pulzních usměrňovačů napěťového typu a jejich využití v praxi. Dále jsou přiblíženy normy pro nabíjení olověných akumulátorových článků a je popsán vlastní návrh řídicího systému s využitím signálového procesoru firmy Texas Instruments TMS320F28335 a dimenzování výkonové části pulzního usměrňovače dle zadání diplomové práce. Odladěný řídicí algoritmus je pak aplikován na realizovaném fyzikálním modelu nabíječe – pulzního usměrňovače, na kterém jsou změřeny základní elektrické veličiny a ověřena správná funkce pulzního usměrňovače jako nabíječe.

Klíčová slova: DSP, pulzní usměrňovač, olověný akumulátor, řídicí systém, řídicí algoritmus, nabíjení akumulátorových článků, PI regulátor, nabíjecí charakteristiky;

Abstract:

The thesis deals with the issue of charging batteries by pulse rectifier. The aim of this thesis is design and control algorithm for the application of pulse rectifier. On the one hand the thesis solves algorithms for managing the actual pulse rectifiers, and other subordinate its own algorithms suitable for charging batteries. Implementing output of the thesis will also serve as a low-power model for battery charging traction drives. The work follows a general description of the voltage pulse rectifier type and its use in practice. Furthermore, it describes standards for charging lead-acid storage battery cells and also describes its own control system design using digital signal processor from Texas Instruments TMS320F28335 and sizing of the power pulse rectifier according to the order of the thesis. Debugging of the control algorithm is then applied to a physical model realized charger - pulse rectifier, where the basic electrical quantities are measured and verified correct function of pulse rectifiers as a charger.

Key words: DSP, pulse rectifier, lead-acid battery, control system, control algorithm, charging battery cells, PI regulator, charging characteristic;

Seznam použitých symbolů a zkratek:

Značky

C_D	[F]	- kondenzátorová baterie
C_N	[Ah]	- kapacita baterie
f_{PWM}	[Hz]	- frekvence pulzní šířkové modulace
f_S	[Hz]	- síťová frekvence
I_I	[A]	- fázová hodnota vstupního proudu
i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}	[A]	- okamžité hodnoty vstupních fázových proudů
$i_{1\alpha}, i_{1\beta}$	[A]	- reálná a imaginární složka vektoru proudu
I_C	[A]	- jmenovitý kolektorový proud tranzistoru
I_D	[A]	- proud meziobvodu – nabíjecí proud
i_d	[A]	- činná složka proudu
I_N	[A]	- jmenovitý proud
i_q	[A]	- jalová složka proudu
I_S	[A]	- síťový proud (hodnota sdruženého proudu)
$K_{A/D}$	[-]	- zesílení A/D převodníku
K_I	[-]	- integrační zesílení
K_M	[-]	- zesílení měniče
K_{MF}	[-]	- zesílení PWM modulace
K_{RIu}	[-]	- zesílení proudového regulátoru
L	[H]	- indukčnost, tlumivka
L_f	[H]	- filtrační indukčnost fázová indukčnost
η_{Ah}	[%]	- ampérhodinová proudová účinnost
P_{IN}	[W]	- vstupní výkon
P_{OUT}	[W]	- výstupní výkon
P_{TOT}	[W]	- ztrátový výkon
R_f	[Ω]	- vstupní odpor jedné fáze
R_{th}	[K/W]	- tepelný odpor

$Q_{nab.}$	[C]	- elektrický náboj dodávaný při nabíjení
$Q_{vyb.}$	[C]	- náboj dodávaný při vybíjení
τ_{RIu}	[s]	- časová konstanta proudového regulátoru
ω_S	[rad/s]	- uhlová frekvence sítě
T_{PWM}	[s]	- perioda pulzní šířkové modulace
U	[V]	- vektor napětí
U_1	[V]	- vstupní fázové napětí
U_{CES}	[V]	- jmenovité napětí tranzistoru
U_D	[V]	- napětí meziobvodu
u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}	[V]	- okamžité hodnoty vstupních fázových napětí
$u_{1\omega}, u_{1\beta}$	[V]	- reálná a imaginární složka vektoru napětí
u_d, u_q	[V]	- okamžité hodnoty činné a jalové složky napětí
u_D	[V]	- okamžitá hodnota napětí v meziobvodu
U_N	[V]	- jmenovité napětí
U_S	[V]	- sdružená hodnota napětí
U_Z	[V]	- úbytek napětí na zátěži Z
$U_{vyb,s}, U_{nab,s}$	[V]	- vybíjecí a nabíjecí napětí akumulátoru

Symbols a zkratky

ADC	- Analog Digital Converter
CPU	- Central Procesor Unit, mikroprocesor
D	- dioda
DSP	- Digital Signal Procesor
F_R	- přenos regulátoru
F_{OM}	- přenos optimálního modulu
F_{OIu}	- přenos otevřené smyčky regulátoru proudu
PWM	- Pulse Width Modulation
S	- spínač, průřez
SCI	- Serial Communication Interface

Obsah:

1	Úvod.....	10
2	Nabíjení olověných akumulátorů.....	11
2.1	Účinnost akumulace elektrické energie	11
2.2	Základní elektrické parametry olověných akumulátorů.....	11
2.2.1	Jmenovité napětí článku U_N	12
2.2.2	Plynovací napětí a konečné nabíjecí napětí.....	12
2.3	Nabíjení a nabíjecí charakteristiky.....	12
2.3.1	Nabíjecí charakteristika typu I	13
2.3.2	Nabíjecí charakteristika typu U	13
2.3.3	Nabíjecí charakteristika typu W	14
2.3.4	Nabíjecí charakteristika typu IU1a	15
2.4	Znaky plného nabití olověného akumulátoru	16
3	Pulzní usměrňovač	17
3.1	Proudový pulzní usměrňovač	17
3.2	Napěťový pulzní usměrňovač	18
3.2.1	Princip činnosti 3 - f napěťového pulzního usměrňovače	19
3.3	Řízení pulzního usměrňovače	21
3.3.1	Vektorové řízení pulzního usměrňovače.....	22
3.3.2	Struktura vektorového řízení pulzního usměrňovače	24
3.3.3	Návrh regulátorů proudu a napětí.....	25
4	Řídicí systém pulzního usměrňovače.....	28
4.1	Signálový procesor TMS320F28335	29
4.1.1	Základní specifikace.....	29
4.1.2	A/D převodník.....	29
4.1.3	ePWM modulátor	31
5	Dimenzování výkonové části pulzního usměrňovače	33
5.1	Návrh výkonových spínacích prvků.....	33
5.2	Výpočet chladiče	35
5.3	Jistění.....	38
6	Program pro řízení pulzního usměrňovače.....	39
6.1	Obecný popis.....	39
6.2	Struktura programu	39

6.2.1	Deklarace funkcí	39
6.2.2	Tělo programu	40
6.2.3	Přerušení od A/D převodníku.....	41
6.3	Algoritmus nabíjecí charakteristiky IU1a	43
6.4	Ovládací rozhraní pulzního usměrňovače v prostředí LabView	43
7	Ověření funkčnosti navrženého algoritmu.....	45
7.1	Dosažené výsledky – ověření nabíjecí charakteristiky	45
7.2	Průběhy vstupních a výstupních veličin.....	46
8	Závěr.....	48
	Použitá literatura:	49
	Manuály a datové listy:.....	49
	Seznam příloh:.....	50

1 Úvod

Využívání polovodičových měničů řízených mikropočítačovým řídicím systémem je v současnosti již standardem nejen u elektrických regulovaných pohonů, ale i u celé řady jiných aplikací jako jsou spínané zdroje pro PC, různé nabíječe s funkcí automatického odpojení při plném nabití a jejich přesnou regulaci, nebo jiné řízené napájecí zdroje. S polovodičovými měniči je však spojeno velké množství zpětných nežádoucích jevů na napájecí síť. S vývojem nových vypínatelných součástek, se otevřela cesta k možnostem snižování rušení v elektrické síti, které byly dlouho odkázané převážně na speciální filtrační prvky, nebo komplikovanější zapojení měničů, které mají řadu nevýhod a v neposlední řadě, prodražují samotný měnič. Zejména napájení nejčastěji využívaného nepřímého měniče kmitočtu s využitím usměrňovače s vnější komutací je nevýhodné z hlediska účinnosti a neharmonického odběru proudu z napájecí sítě. Toto způsobuje deformaci jalového výkonu. Proto se začaly používat měniče s vlastní komutací, přesněji pulzní usměrňovače, které pracují s účinností rovnou téměř jedné.

V této práci je však analyzován pulzní usměrňovač jako nabíječ olovených akumulátorů. Je použit pulzní usměrňovač napětového typu (přesněji kap. 3.2). Jádrem práce je vytvoření řídicího algoritmu pro zvolený typ pulzního usměrňovače. Toto doplňuje návrh správného zapojení, a vhodné nabíjecí charakteristiky tak, aby nabíjecí proces byl optimální (jak pro napájecí síť, tak pro životnost baterie) a plně automatický. K tomu je využit výkonný signálový procesor firmy Texas Instruments TMS320F28335, který umožňuje programování s plovoucí řádovou čárkou. Pro správné napsání algoritmu nabíjení je však nutno znát i dílčí znalosti o samotné činnosti pulzního usměrňovače, popisu signálového procesoru, a teorií k nabíjení akumulátorů, kterými se rovněž tato práce bude zabývat, v rozsahu diplomové práce a zadání.

2 Nabíjení olověných akumulátorů

Olověné akumulátory jsou nejpoužívanější sekundární elektrochemický zdroj proudu. Vyrábějí se o kapacitách řádově od 1 do 10 000 Ah. Důvodem je dobře zvládnutá technologie výroby olověných akumulátorů, dále pak relativně nízká pořizovací cena, provozní spolehlivost, dobrá účinnost i dostatečný výkon [2]

2.1 Účinnost akumulace elektrické energie

Tento pojem označuje, jak efektivně může akumulátor elektrickou energii akumulovat a následně vydávat. Účinnost klesá se zvyšováním nabíjecího a vybíjecího proudu, s poklesem teplot a stárnutím akumulátoru. Rozlišujeme dva typy účinnosti:

- **Ampérhodinová (proudová) účinnost** – je poměr náboje (Ah) odebraného při vybíjení článku nebo baterie k velikosti náboje potřebného k dobití baterie. Určuje ji následující vztah [2]

$$\eta_{Ah} = \frac{Q_{vyb.}}{Q_{nab.}} \cdot 100 \quad (\%; A \cdot h, A \cdot h) \quad (2.1)$$

- **Watthodinová (energetická účinnost)** – je poměr elektrické energie (Wh) získané vybíjením, k energii dodané akumulátoru nabíjením. Je určena podle následujícího vztahu

$$\eta_{Wh} = \frac{Q_{vyb.} \cdot U_{vyb.s}}{Q_{nab.} \cdot U_{nab.s}} \cdot 100 \quad (\%; A \cdot h, V, A \cdot h, V) \quad (2.2)$$

2.2 Základní elektrické parametry olověných akumulátorů

Mezi základní parametr patří standardní rovnovážné napětí článku $U_{cl}^0 = 2,035 V$. Při dodržení stejné hustoty a teploty elektrolytu odpovídá tomuto napětí i skutečné napětí akumulátoru naprázdno. [2]

2.2.1 Jmenovité napětí článku U_N

Toto napětí je zaokrouhleně 2 V. Pro určení jmenovitého napětí baterie se sériově spojenými články stačí vynásobit jmenovité napětí článku počtem článků baterie.

2.2.2 Plynovací napětí a konečné nabíjecí napětí

Plynovací napětí je 2,4 V na článek, při kterém olověný akumulátor začíná intenzivněji plynovat následkem elektrolyzy vody v elektrolytu za vzniku vodíku a kyslíku.

Konečné nabíjecí napětí je napětí, kterého dosáhne akumulátor po plném nabití na konci nabíjení. Pokračujícím nabíjením konstantním proudem se již jeho hodnota nemění. Podle vnitřního elektrického odporu akumulátoru, teploty a velikosti nabíjecího proudu bývá toto napětí v rozmezí 2,4 – 2,8 V na článek.[2]

2.3 Nabíjení a nabíjecí charakteristiky

Nabíjením se obnovuje a dodává elektrický náboj vybitým článkům akumulátorů. V případě, že výrobce neudává pro své akumulátory jiný nabíjecí proud, používají se u olověných akumulátorů nabíjecí proudy o hodnotě 0,1 až $0,3C_N$ (A), do vzestupu na jejich plynovací napětí 2,4 V/čl. Pokračuje-li nabíjení na vyšší napětí, snižuje se nabíjecí proud na 0,05 až $0,06C_N$ (A) a nabíjení se ukončí po dosažení znaků plného nabití (viz. ods. 2.4). U akumulátorů uzavřených větraných se velikost konečného nabíjecího napětí může pohybovat v rozsahu 2,4 až 2,7 V na článek. Plného nabití akumulátorů se dosahuje dodáním náboje (Ah) přibližně o 15 % větším než kolik se z akumulátoru vybil.

Nabíjení může probíhat podle různých nabíjecích charakteristik. Tyto charakteristiky se dělí do tří základních skupin: [5]

- **charakteristika typu I** – nabíjení konstantním proudem,
- **charakteristika typu U** – nabíjení konstantním napětím,
- **charakteristika typu W** – klesající charakteristika,

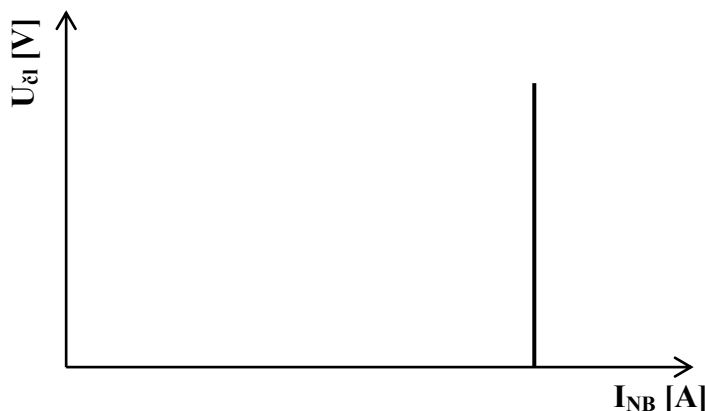
Dané charakteristiky je možné použít samostatně nebo se kombinují tak, aby byl akumulátor optimálně nabíjen a trvale dobíjen. Označení charakteristiky může být doplněno ještě o zkratky **a** – automatické vypínání a **o** – samočinné přepínání na jinou charakteristiku.[5]

2.3.1 Nabíjecí charakteristika typu I

Nabíjení dle této charakteristiky (obr. 2.1) znamená nabíjení akumulátoru konstantním proudem. Během nabíjení roste napětí akumulátoru. Konečná velikost napětí akumulátoru je závislá na nabíjecím proudu, na teplotě elektrolytu a na typu akumulátoru.

Výhody: lineární náběh kapacity s dobou nabíjení, jednoduchá kontrola dodávaného náboje (Ah) vynásobením nabíjecího proudu dobou nabíjení, možnost využití plného výkonu nabíječe během celého procesu nabíjení.

Nevýhody: přetěžování elektrod při vzestupu napětí nad 2,4 V, s růstem napětí se zvyšuje plynování, zvýšení elektrolýzy a koroze mřížek kladných elektrod. [2]

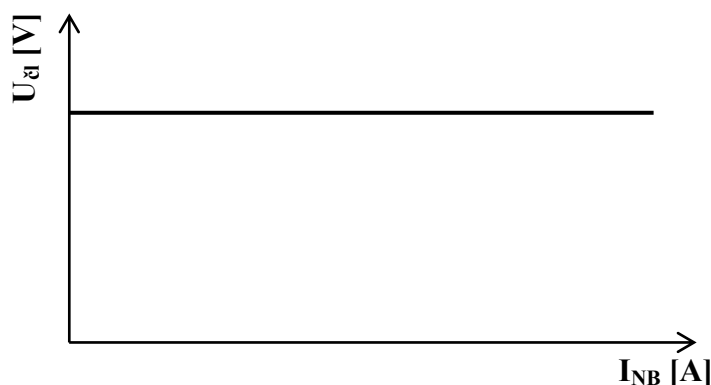


Obr 2.1 Nabíjecí charakteristika typu I (podle DIN)

Použití: nabíjení, malých olověných akumulátorů, uvádění do činnosti startovacích olověných akumulátorů s centrálního rozvodu stejnosměrného proudu. [2]

2.3.2 Nabíjecí charakteristika typu U

Při nabíjení podle charakteristiky U (obr. 2.2) se nabíjí konstantním napětím. Počáteční vysoký nabíjecí proud rychle klesá a pokles se zpomaluje, až se ustálí na hodnotě konstantního napětí. Nabíjecí proud v závěru nabíjení je tak nízký, že nepoškozuje akumulátor. Při konstantním napětí 2,40 V/čl. je možné nabitý akumulátor dále nabíjet ještě 24 hodin. V případě plného nabití akumulátoru se nabíjecí proud pohybuje kolem $0,01C_N$ (A). Při konstantním napětí 2,23V/čl. lze olověný akumulátor po nabití bez přerušení dále trvale dobíjet po celou dobu jeho životnosti. Nabíjecí zařízení musí mít velký výkon a přesnou regulaci napětí. Plynovací napětí nesmí být překročeno o více než 1 %. [2]



Obr. 2.2 Nabíjecí charakteristika typu U (podle DIN)

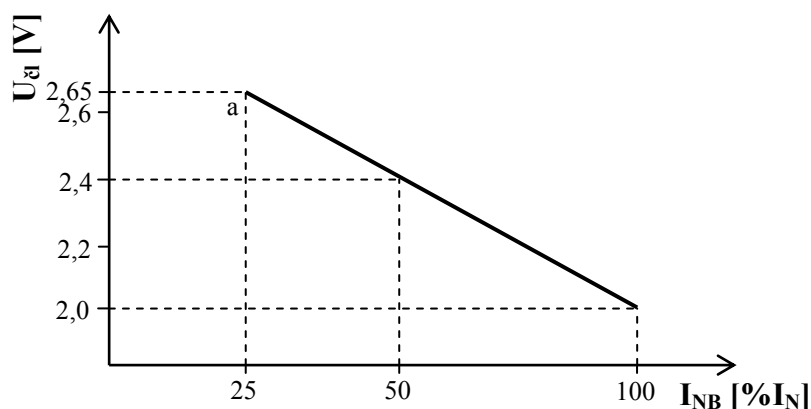
Výhody: rychlá obnova elektrického náboje na počátku nabíjení, šetrné nabíjení malým proudem v závěru nabíjení

Nevýhody: velké výkony nabíječů pro počáteční velké proudy, které na konci nabíjení již nejsou zapotřebí

Použití: nabíjení olověných akumulátorů, nabíjení Ni-Cd akumulátorů [5]

2.3.3 Nabíjecí charakteristika typu W

Při použití této charakteristiky (obr. 2.3) se uskutečňuje nabíjení klesajícím proudem v závislosti na vzestupu napětí nabíjených akumulátorů. Počáteční nabíjecí proud je menší než u nabíjecí charakteristiky U a konečný nabíjecí proud je menší než u nabíjecí charakteristiky I. Počáteční nabíjecí proudy je možné používat v mezích 0,1 až 0,3C_N (A) a konečný nabíjecí proud 0,05C_N (A). [2]



Obr. 2.3 Nabíjecí charakteristika typu W (podle DIN)

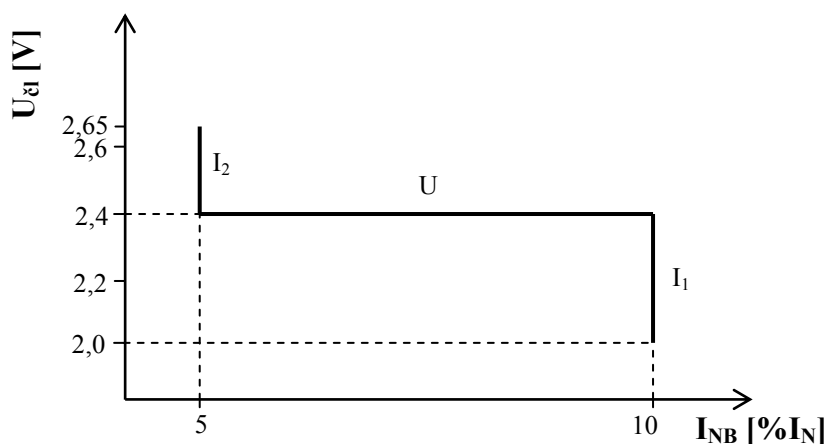
Výhody: jednoduchá a levnější konstrukce nabíječe

Nevýhody: velikost výstupních parametrů je závislá na kolísání sítě střídavého napětí

Použití: nabíjení startovacích a trakčních akumulátorů

2.3.4 Nabíjecí charakteristika typu IU1a

Při nabíjení charakteristikou *IUIa* (obr. 2.4) se nabíjí ve třech stupních. V prvním stupni se baterie nabíjí konstantním proudem až do plynovacího napětí. Ve druhém stupni, při konstantním plynovacím napětí, klesá proud. Ve třetím stupni se nabíjí konstantním proudem při rostoucím napětí až do úplného nabití. Nabíjení se ukončí buď po uplynutí nastaveného času ve třetí fázi nabíjení, nebo po dodání potřebného náboje (Ah).



Obr. 2.4 Nabíjecí charakteristika IU1a (podle DIN)

Tento způsob nabíjení se používá k nabíjení olověných trakčních akumulátorů, v co možná nejkratším čase. Přípustný nabíjecí proud třetího úseku je $I_2 = 0,05C_N$ (A).

Nabíječe využívající této charakteristiky jsou středně složité, avšak často používané a osvědčené. Uvedená charakteristika rovněž vykazuje velmi dobré a šetrné nabíjení akumulátorů a tudíž zároveň jejich prodlouženou životnost. [2]

Právě pro příznivé vlastnosti této kombinace charakteristik bude zmíněná nabíjecí charakteristika implementována i do řešeného řídicího algoritmu pulzního usměrňovače.

2.4 Znaky plného nabití olověného akumulátoru

Baterie se jmenovitým napětím 12V je plně nabita, dosáhne-li napětí na svorkách 15,0 až 16,5V při nabíjecím proudu 0,05 až 0,1 C_N (A), všechny články rovnoměrně plynoují, hustota ve všech člancích dosahuje 1,28g/cm³ a během 2 až 4 hodin pokračujícího nabíjení se uvedené hodnoty již nemění. [2]

Akumulátory uzavřené, větrané v cyklickém provozu

Znaky plného nabití:

- při nabíjení proudem (charakteristika I) již nedochází k vzestupu nabíjecího napětí v rozmezí 2 až 4 hodin,
- při nabíjení napětím (charakteristika U) již proud poklesl na nejnižší hodnotu, která se během 4 až 6 hodin nemění,
- hustota elektrolytu dosáhla již nejvyšší hodnoty,
- elektrody obou polarit ve všech člancích rovnoměrně plynoují

Akumulátory se zaplavenými elektrodami v provozu trvalého dobíjení

Znaky plného nabití:

- proud trvalého dobíjení poklesl na nejnižší hodnotu, která se v dalších 16 až 24 hodinách již nemění,
- napětí bateriových bloků je vyrovnané a s pokračujícím trvalým dobíjením se již nemění,
- hustota elektrolytu dosáhla nejvyšší hodnoty, která se po dobu 16 až 24 hodin nemění.

3 Pulzní usměrňovač

Pulzní usměrňovač patří do skupiny měničů s vlastní komutací. To znamená, že zdroj komutačního napětí je umístěn ve vlastním obvodu měniče. Jak již bylo zmíněno v úvodu, pulzní usměrňovače se používají zejména pro své výhodné vlastnosti, které umožňují odběr v podstatě sinusového proudu ze zdroje a téměř jednotkový účinnost, což je docíleno právě využíváním výhod vlastní komutace. [1]

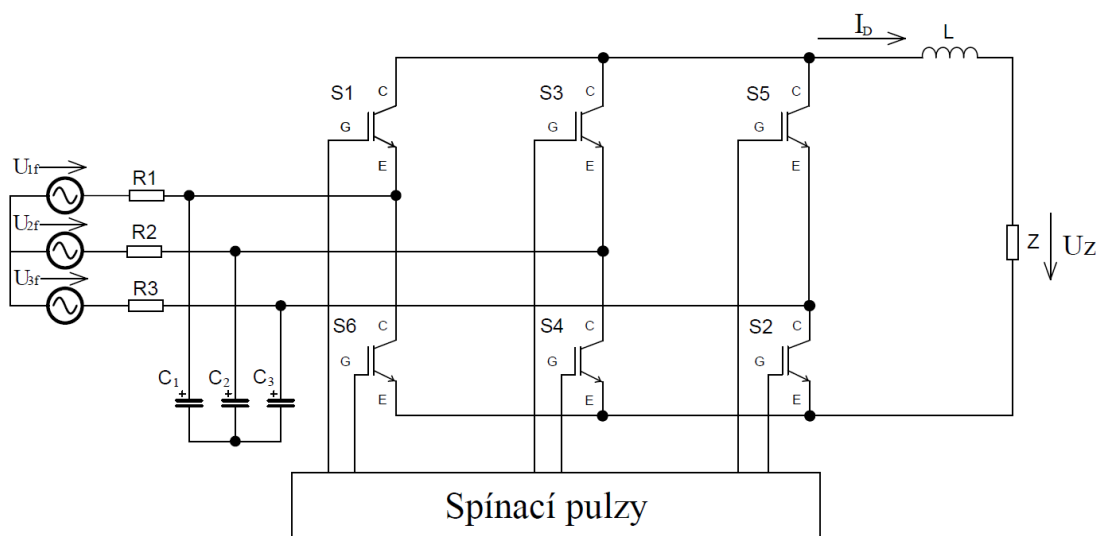
Podle toho jaké napětí a proud jsou charakteristické pro stejnosměrnou stranu, rozlišujeme pulzní usměrňovače proudového nebo napěťového typu. V obou případech se konstrukčně jedná v podstatě o střídače, které pracují v obráceném režimu.

Rozdělení pulzních usměrňovačů:

1. Podle počtu fází:
 - a) 1-fázové,
 - b) 3-fázové.
2. Podle charakteru stejnosměrné strany:
 - a) proudové pulzní usměrňovače (obr. 3. 1) ,
 - b) napěťové pulzní usměrňovače.

3.1 Proudový pulzní usměrňovač

Největší využití proudového pulzního usměrňovače je pro práci do běžné stejnosměrné zátěže, jakou je například stejnosměrný motor nebo samozřejmě jako zdroj pro proudový střídač. Měnič umožňuje průchod výkonu v obou směrech.



Obr. 3.1 3-fázový proudový pulzní usměrňovač

Analogicky jako u proudového střídače je na vstupní straně připojena kondenzátorová baterie, která plní nezbytnou akumulaci funkci.[1]

3.2 Napětový pulzní usměrňovač

Dále se teoretická část práce bude zabývat analýzou napětové varianty 3-f pulzního usměrňovače (obr. 3.2), která je uvažována i pro návrh nabíječe. Důvodů pro použití tohoto typu usměrňovače je několik.

V nabíjecím procesu se vyskytuje jak nabíjení konstantním proudem, tak i konstantním napětím. Pro regulaci na $I = konst.$ se z principu jeví výhodnější použití proudového typu a naopak pro regulaci na $U = konst.$ je vhodnější napětový typ pulzního usměrňovače. V případě proudového typu je však problém z hlediska rozšíření o zpětně závěrné součástky a pro regulaci napětí by musela být zavedena zpětná vazba napětí z meziobvodu. U napětového typu se musí naopak zavést smyčka proudu meziobvodu, ale tu je nutné řešit v obou případech. Navíc baterie je soustava napětově velmi pomalá, takže dramatické změny napětí na kondenzátoru nehrozí. Jediný problém pro použití napětového pulzního usměrňovače je u systémů s malým napětím akumulátorů, které z principu nejde tímto typem usměrňovače řešit. V našem případě je však reálný nabíječ uvažován pro napětovou hladinu akumulátoru 850V, což není problém navázat přímo na síť. Rovněž u vyšší napětové hladiny a napětově pomalejší soustavy je možné docílit i regulaci proudu.

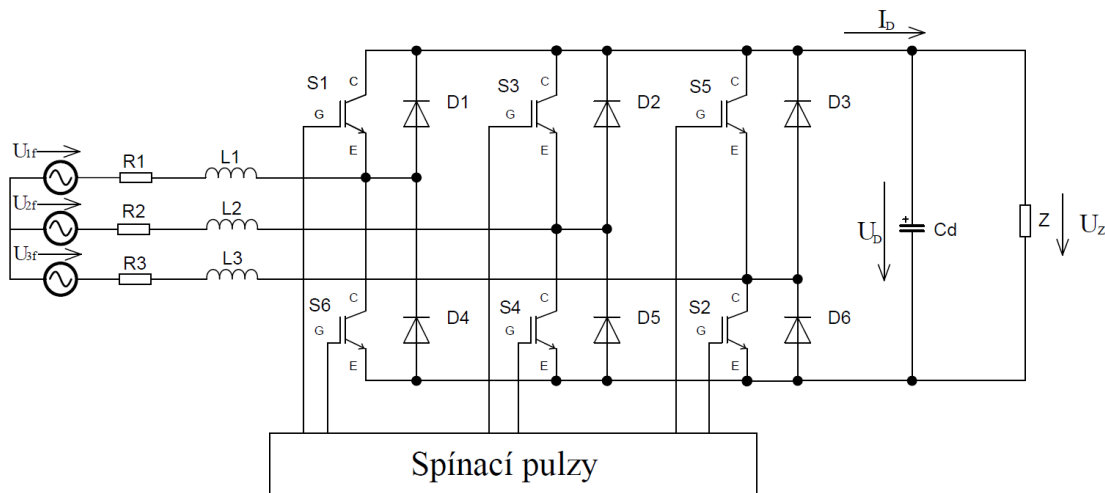
Při návrhu algoritmu se však bude pracovat s akumulátorem o jmenovitém napětí $U_N = 350V$. Pulzní usměrňovač bude tedy nutno napájet sníženým sdruženým napětím o velikosti

$$U_S = 230V (U_I = 133V).$$

Napětové pulzní usměrňovače se od proudových pulzních usměrňovačů odlišují tím, že mají stejnosměrnou stranu spojenou s kondenzátorem, který umožňuje udržovat přibližně konstantní napětí na výstupu. Proto se jeví jako výhodné jeho použití pro napájení napětového střídače. Napětový pulzní usměrňovač je rovněž možné využít pro napájení stejnosměrného motoru, kde je však nutno vybavit pulzní usměrňovač ještě snižujícím měničem pro umožnění říditelnosti výstupného proudu. [1]

3.2.1 Princip činnosti 3 - f napětového pulzního usměrňovače

Na obrázku 3.2 je schéma 3 - f napětového pulzního usměrňovače. Výkonový obvod je totožný s 3 - f střídačem. Rovněž algoritmus spínání součástek vychází z podobných principů, které jsou používány u střídačů.

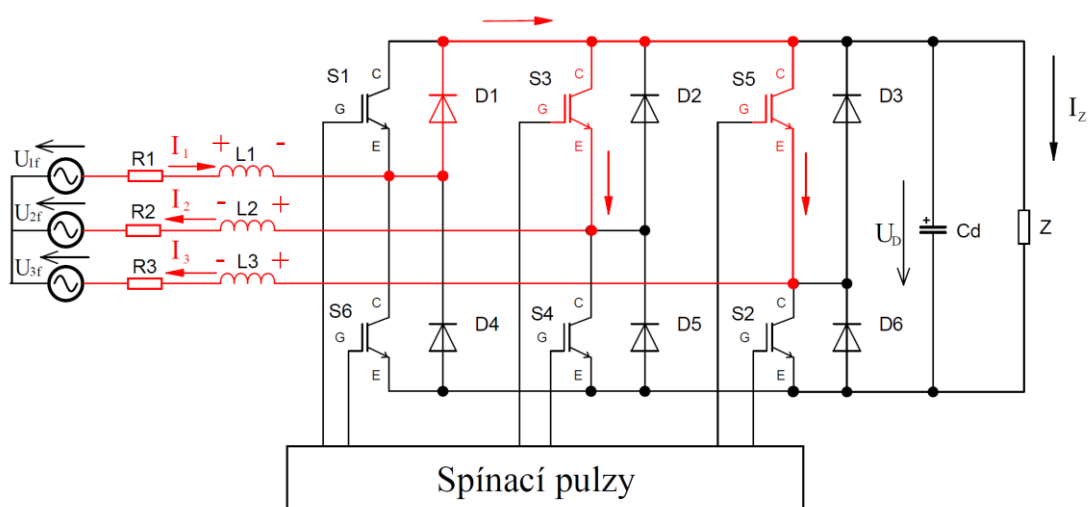


Obr. 3.2 Schéma 3-f napětového pulzního usměrňovače

Spínání polovodičových součástek musí být synchronizováno s napájecím napětím usměrňovače. Základní funkce napětového pulzního usměrňovače spočívá v udržování napětí stejnosměrného meziobvodu na požadované hodnotě. Toto napětí musí být vždy min. o 12% vyšší, než je amplituda vstupního napájecího napětí. Vyšší napětí na výstupu je dosaženo vhodným algoritmem řízení, přičemž se využívá akumulací vlastností vstupních tlumivek. Činnost napětového pulzního usměrňovače je založena v podstatě na dvou základních opakujících se taktech (fázích):

1. *nabíjecí* - nabíjení vstupní indukčnosti,
2. *vybíjecí* – vybíjení indukčnosti.

Na obr. 3.3 je znázorněn první (nabíjecí) takt vstupních indukčností pro první fázi. V závislosti na vyhodnocení spínacích pulzů řídicího obvodu dojde k sepnutí spínačů S_3 , S_5 a proud se následně uzavře se sousedními fázemi přes zpětnou diodu D_1 a sepnuté spínače, čím narůstá energie akumulována v tlumivkách L_2 a L_3 . [4]

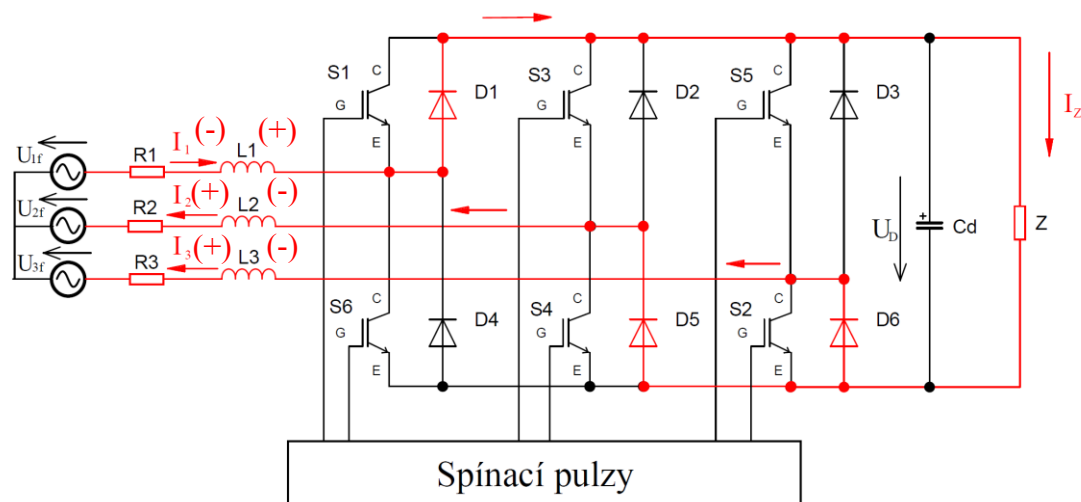


Obr. 3.3 Takt č. 1- nabíjení vstupní indukčnosti

Následně dochází ke komutaci proudu v obvodu vypnutím spínačů S_3 , S_6 a energie naakumulována ve vstupních tlumivkách se dostává na výstupní kondenzátor C_D (obr. 3.4) přes diody D_5 a D_6 , což zabezpečí, že napětí na výstupu bude vyšší než amplituda vstupního napětí. Usměrňovač tedy funguje v podstatě jako měnič pro zvyšování napětí. [4]

Obdobný nabíjecí a vybíjecí cyklus je možno odvodit i pro ostatní fáze, přičemž logika spínání je dána regulační strukturou, zabezpečující konstantní napětí na výstupu usměrňovače.

K dosažení podmínky konstantního napětí na výstupu, se napětí stejnosměrného meziobvodu měří a porovnává s referenčním napětím U_{REF} . Z dané regulační odchylky se pak generují spínací *PWM* pulzy pro šest spínačů (přesněji kap. 3.3.2). [4]

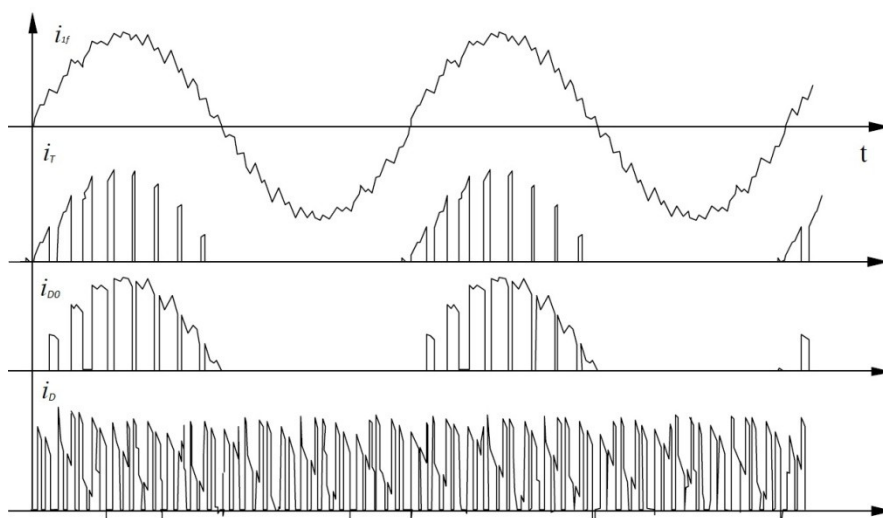


Obr. 3.4 Takt č. 2 - vybíjení vstupní indukčnosti

Tímto způsobem, můžeme dodávat nebo odebírat energii ze zdroje střídavého napětí podle platných požadavek napětí v meziobvodu. Napětí U_D se měří na kondenzátoru C_D . Modulační napětí U_{MOD} má stejnou frekvenci jako síťové napětí.

Když je proud I_D kladný (usměrňovačový chod), je kondenzátor C_D vybíjen, a zpětnovazební signál způsobí v regulačním bloku dodávání energie do kondenzátoru. Ovládací blok generuje odpovídající *PWM* signály pro šest spínačů. Tímto způsobem, je proud dodáván ze střídavé strany na stranu stejnosměrnou a kondenzátoru se zvyšuje napětí.

Naopak, když nastane, že proud I_D je záporný (invertorový chod), je kondenzátor C_D vybíjen na nižší napětí, a zpětnovazební signál způsobí zpětný tok energie do zdroje. [4]



Obr. 3.5 Průběhy proudů: na vstupu (i_l), příslušným tranzistorem (i_T), diodou (i_{D0}) a na výstupu (i_D) pro jednu fázi 3-f napětového plzního usměrňovače [4]

3.3 Řízení pulzního usměrňovače

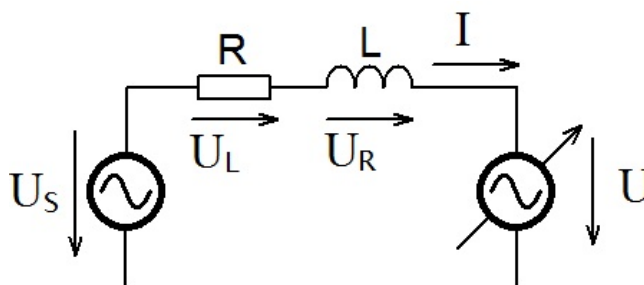
Řízení je v principech stejné jako u napětových střídačů. U pulzních usměrňovačů se rozlišuje řízení:

- regulace úhlu θ* – regulace založená na modelu,
- dvouhodnotová regulace proudu odebíraného ze sítě*,
- vektorové řízení* - v současné době nejvyužívanější způsob řízení využívající výhod signálových procesorů. [1]

3.3.1 Vektorové řízení pulzního usměrňovače

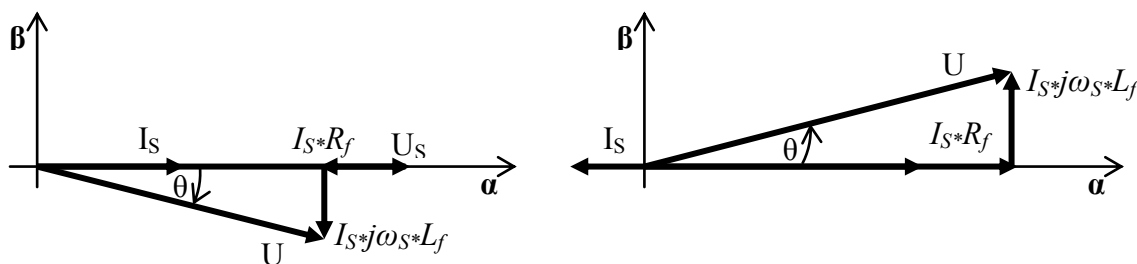
Vychází ze stejných principů jako vektorové řízení střídače. Podobně jako u střídavých strojů můžeme zavést prostorový vektor napětí a proudu. Princip spočívá v rozložení prostorového vektoru síťového proudu podle polohy prostorového vektoru síťového napětí a regulace jednotlivých složek tohoto proudu odděleně tak, aby se vzájemně neovlivňovaly. Jednotlivé složky proudu pak představují činný a jalový proud odebíraný ze sítě, resp. dodávaný proud do sítě. [3]

Pro vytvoření vektorového diagramu (obr. 3.7) v komplexní rovině $[\alpha, \beta]$ a pro odvození vztahů pro výpočet výstupního napětí můžeme zavést matematický model pulzního usměrňovače. Na obr. 3.6 je náhradní schéma jedné fáze usměrňovače. [3]



Obr. 3.6 Náhradní schéma jedné fáze usměrňovače

Zdroj U_S představuje ideální zdroj střídavého napětí s amplitudou fázového napětí U_S a síťovou frekvencí f_S . Řízený napět'ový zdroj U představuje jednu větev pulzního usměrňovače, velikost amplitudy jeho napětí pak odpovídá velikosti napětí v meziobvodu a velikosti řídicího napětí pro PWM modulátor. Pomocí jeho velikosti a fázového posuvu dosahujeme požadované hodnoty a směru proudu I . Správným řízením se snažíme dosáhnout, aby síťový proud byl ve fázi nebo v protifázi se síťovým napětím. [3]



Obr. 3.7 Vektorové diagramy v komplexní rovině

Pokud je odebíraný proud ze sítě ve fázi se síťovým napětím, odebíráme činný výkon ze sítě, pokud je proud v proti fázi, odebíraný činný výkon je záporný, tudíž dodáváme energii zpět do sítě [3]. Z vektorových diagramů pak můžeme sestavit následující rovnice pro popis jedné fáze pulzního usměrňovače v komplexní rovině:

$$U = U_S - I_S \cdot (R_f + j\omega_S L_f) \quad (3.1)$$

Velikost vektoru napětí U a úhel θ je pak možné jednoduše vyjádřit dle vztahů [3]:

$$U = \sqrt{(U_S + I_S \cdot R_f)^2 + (I_S \cdot \omega_S L_f)^2} \quad (3.2)$$

$$\theta = \arctg \frac{-I_S \cdot \omega_S L_f}{U_S - I_S \cdot R_f} \quad (3.3)$$

Dle vztahů (3.2) a (3.3) je dále možno vypočíst důležité parametry, především velikost filtrační tlumivky. Pro vyřešení okamžitých hodnot se vychází ze vztahu (3.4) a následně se provede transformace do dvoufázového systému:

$$u^S = u_S^S - R_f I_S^S - j\omega_S L_f \frac{di_S^S}{dt} \quad (3.4)$$

Vektorovým natočením do orientovaného systému souřadnic $[d, q]$ a po následné úpravě získáváme následující rovnice popisující chování řízeného usměrňovače v systému orientovaných souřadnic [8]:

$$L_f \frac{d(i_d)}{dt} = u_{sd} - i_d R_f + \omega_S L_f i_q - u_d \quad (3.5)$$

$$L_f \frac{d(i_q)}{dt} = u_{sq} - i_q R_f + \omega_S L_f i_d - u_q \quad (3.6)$$

To znamená, že i výsledně pro požadované napětí a proudy na vstupu a výstupu pulzního usměrňovače, jsou výrazně závislé na velikosti vstupní indukčnosti (indukčnosti vstupních tlumivek). Podobně jako u točivých strojů existuje mezi složkami u_d a u_q vzájemná křížová vazba. Abychom mohli tyto dvě složky regulovat nezávisle na sobě je nutno zrušit jejich vzájemnou křížovou vazbu. Toto se provede aplikováním následujících dvou vztahů do řídicího systému usměrňovače [8] :

$$u_d = -u_d^* + \omega_S L_f i_q + u_{sd} \quad (3.7)$$

$$u_q = -u_q^* + \omega_S L_f i_d + u_{sq} \quad (3.8)$$

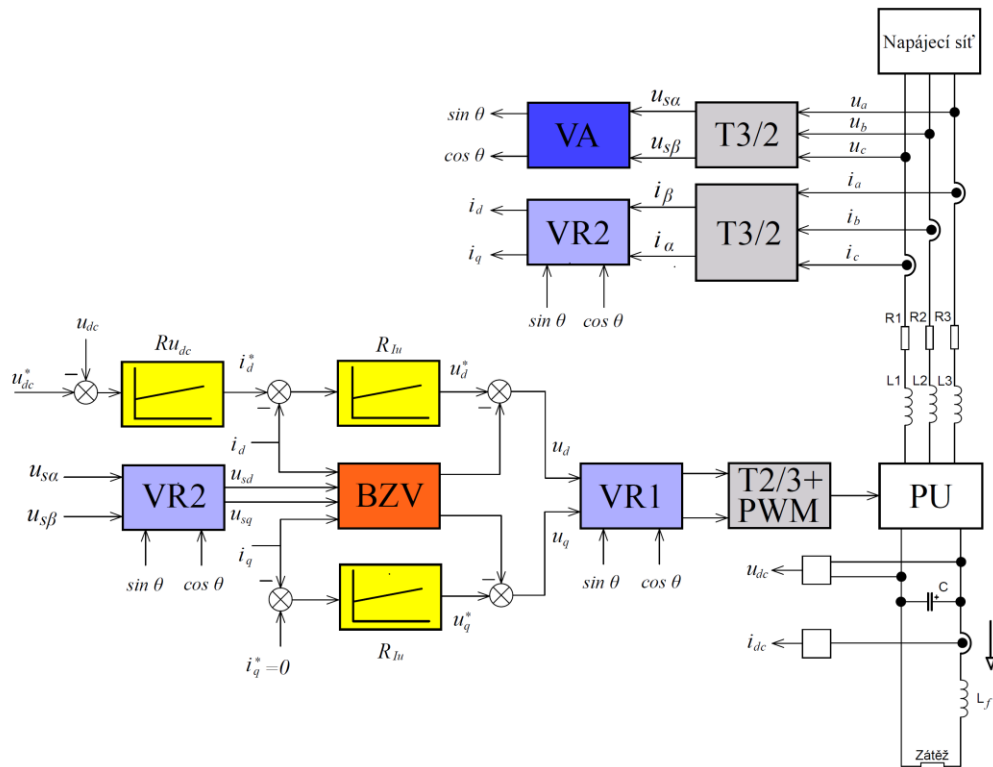
3.3.2 Struktura vektorového řízení pulzního usměrňovače

Na obrázku 3.8 je zobrazena regulační struktura pulzního usměrňovače. Tato struktura je již přizpůsobena pro aplikaci nabíječe olověných akumulátorů. Struktura obsahuje některé bloky již známé z vektorového řízení točivých strojů. Abychom bylo možné zjistit velikost, resp. hodnoty sinu a cosinu orientujícího úhlu θ , měří se nejdříve tři fázová napětí pomocí čidel napětí. Tyto napětí jsou pak transformovány dle vztahu (3.9) a výstupní napětí z bloku transformace $T3/2$ jsou následně vektorově analyzovány v bloku VA dle vztahu (3.11). [3]

$$\begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$u_m = \sqrt{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} \quad (3.10)$$

$$\sin \theta = \frac{u_{s\beta}}{u_m}, \quad \cos \theta = \frac{u_{s\alpha}}{u_m} \quad (3.11)$$



Obr. 3.8 Blokové regulační schéma pulzního usměrňovače

Rovněž se měří tři vstupní proudy a dle vztahu (3.9) se transformují do dvou souřadnicového systému $[\alpha, \beta]$. Pomocí orientujících veličin ($\sin \theta$ a $\cos \theta$) jsou dále v bloku vektorové rotace tyto transformované proudy tekoucí vstupními tlumivkami natočeny. Skutečné proudy v souřadném systému $[d, q]$ jsou dále porovnávány se žádanými hodnotami v regulátorech činného a jalového proudu. V bloku *BZV* je dále dle vztahů (3.7) a (3.8) vypočtena složka napětí, která se přičítá k výstupnímu žádanému napětí pro řízený usměrňovač. Dále je provedena zpětná rotace a transformace 2/3 do třífázového systému pro PWM modulátor, který následně vytváří pulzy pro řízení pulzního usměrňovače. Jalová složka proudu i_q je nastavena na nulové hodnotě pro dosažení maximálního (jednotkového) účinníku a žádanou hodnotu činného proudu i_d zadává regulátor napětí v meziobvodu.[3]

Podobně je měřen výstupní proud, který slouží pro proudovou regulaci výstupního nabíjecího proudu. Pro dosažení konstantního žádaného napětí v meziobvodu a zároveň řízení výstupního proudu je regulace proudu provedena přes omezení regulátoru napětí meziobvodu.

Na výstupu je použita tlumivka L_f , která kompenzuje výrazně malou časovou konstantu baterie při změnách nabíjecího proudu a zároveň slouží jako filtrační indukčnost.

3.3.3 Návrh regulátorů proudu a napětí

Z rovnic (3.7) a (3.8) je možné definovat přenos pulzního usměrňovače [3]:

$$L_f \frac{d(i_d)}{dt} = -i_d R_f + u_d^* \quad (3.12)$$

$$L_f \frac{d(i_q)}{dt} = -i_q R_f + u_q^* \quad (3.13)$$

Přenos otevřené smyčky proudové regulace lze dle obrázku 3.9 vyjádřit vztahem:

$$F_{Olu} = F_{Rlu} \cdot F_{MF} \cdot F_M \cdot F_{AD} \cdot F_I, \quad (3.14)$$

kde

F_{Rlu} přenos regulátoru

F_{MF} přenos PWM

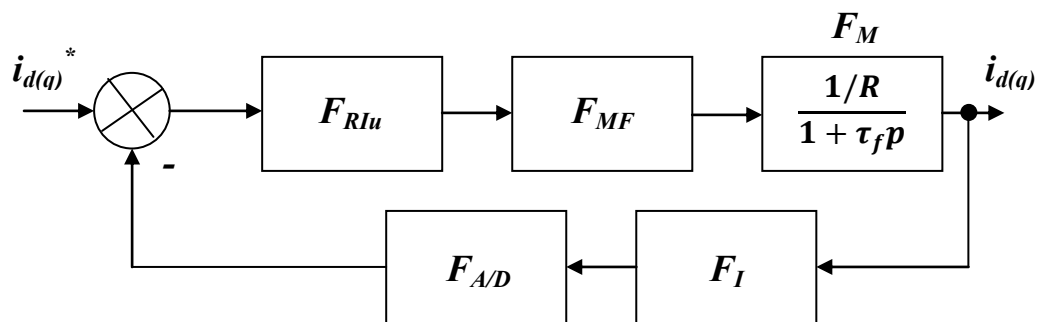
F_M přenos měniče

F_{AD} přenos A/D převodníku

F_I přenos proudového čidla

Po dosazení a úpravě dle vztahu (3.14):

$$F_{Olu(p)} = K_{Rlu} \frac{1 + p\tau_{Rlu}}{p\tau_{Rlu}} \cdot \frac{K_{MF} K_I K_{A/D}}{R_f} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_f} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{NKlu}} \quad (3.15)$$



Obr. 3.9 Blokové schéma regulační smyčky proudu [8]

$$\tau_f = \frac{L_f}{R_f}, \tau_{NKlu} = 1,5 \cdot \tau_{olu} + \tau_M, \quad (3.16)$$

kde

τ_{olu}vzorkovací perioda regulační smyčky proudu,

τ_Mčasová konstanta přenosu pulzního usměrňovače

Z rovnice (3.15) se metodou optimálního modulu vypočtou parametry regulátoru proudové smyčky:

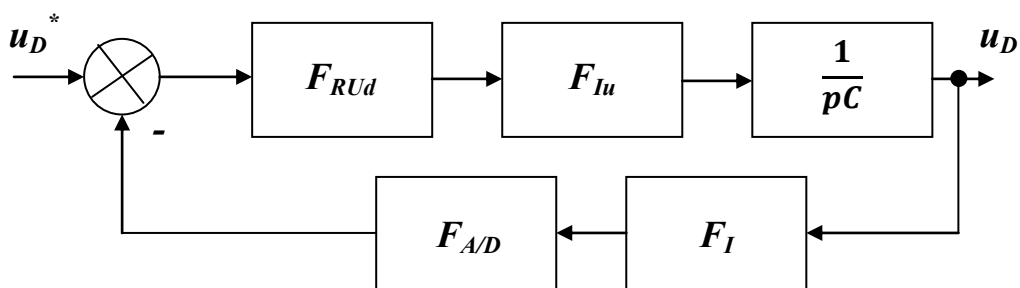
$$F_R = \frac{F_{OM}}{F_{olu}} = \frac{1}{K_{Rlu} \frac{1 + p\tau_{Rlu}}{p\tau_{Rlu}} \cdot \frac{K_M K_I K_{A/D}}{R_f} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_f} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{NKlu}}} \quad (3.17)$$

- regulátorem se snažíme kompenzovat největší časovou konstantu regulované soustavy, tj. $\tau_{Rlu} = \tau_f$

Po úpravě rovnice (3.17) s využitím (3.16) dostáváme PI regulátor s parametry:

$$K_{Rlu} = \frac{R_f}{K_M \cdot K_I \cdot K_{A/D}} \cdot \frac{\tau_{Rlu}}{2\tau_{NKlu}}, K_I = \left(K_{Rlu} \cdot \frac{\tau_{olu}}{\tau_{Rlu}} \right) \quad (3.18)$$

Napětový regulátor (obr. 3.10) a jeho parametry lze určit obdobně. Jejich analytický výpočet je však značně obtížnější. Napětový regulátor lze řešit jako nadřizenou smyčku s podřizenou smyčkou regulace proudu. Při nastavování regulátoru napětí i proudu v praxi je pro vliv mnoha prvků jednodušší nastavit jejich parametry odhadem a dále při testování postupně upravovat. [3]

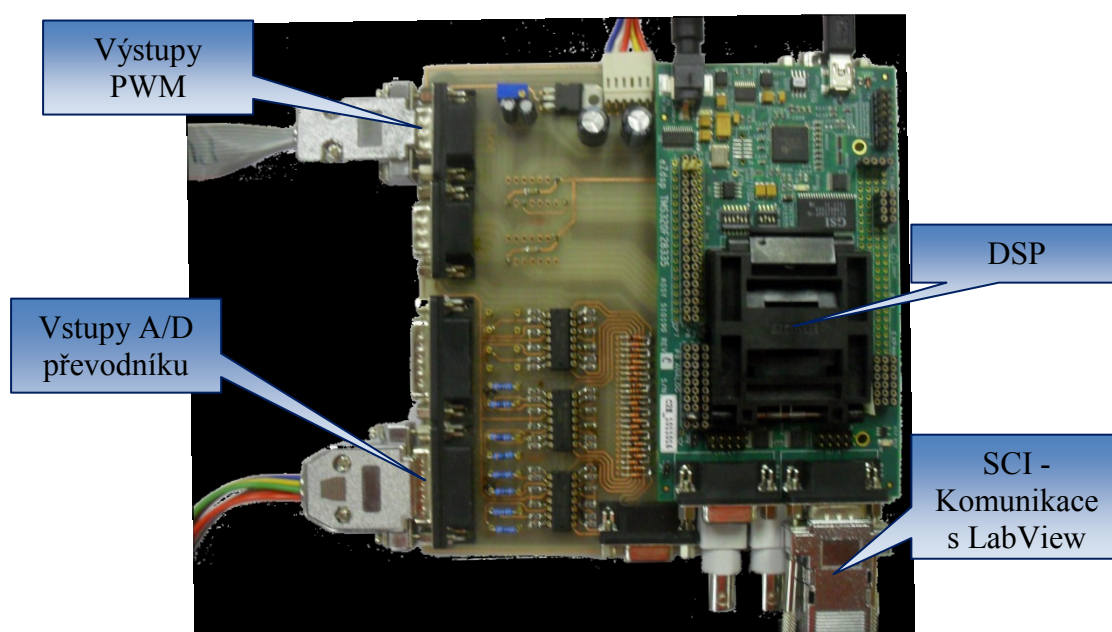


Obr. 3.10 Blokové schéma regulační smyčky napětí

Vypočtené parametry jsou v řídicím algoritmu použity jako prvotní odhadované hodnoty konstant regulátoru a postupně se tyto parametry upravili tak, aby regulace proudu i napětí byla co nejpříznivější.

4 Řídicí systém pulzního usměrňovače

Na obrázku 4.1 je vidět řídicí systém, který byl použit pro vývoj a otestování algoritmu řízení pulzního usměrňovače. Řídicí systém se skládá s vývojového kitu firmy *Spectrum Digital*, který je osazen signálovým procesorem *Texas Instruments TMS320F28335*. Tento vývojový kit je zasazen do rozšiřující desky vyrobené na katedře Elektroniky. Tato deska slouží pro úpravu úrovní a rozšíření periférií z vývojového kitu na potřebné konektory. Jak je vidět z obrázku pro řízení pulzního usměrňovače je využíváno 8 vstupů A/D převodníku na měření vstupních a výstupních veličin.



Obr. 4.1 Řídicí systém pulzního usměrňovače

Dále je zapotřebí sériové rozhraní *SCI* pro komunikaci přes *RS232* s *LabView* a výstupy *PWM* signálů, které jsou přivedeny na vstupy budičů výkonových *IGBT* tranzistorů.

Jako převodník úrovní A/D převodníku z $\pm 10V$ na úroveň *DSP* 0-3 V byl použitý operační zesilovač *LM348N*.

4.1 Signálový procesor TMS320F28335

4.1.1 Základní specifikace

Největší výhodou mikroprocesoru F28335 z řady TMS320 patří float jednotka, která umožňuje přímo zpracovávat desetinná čísla. To znamená především zjednodušení práce při programování procesoru, kde odpadají komplikace při normování čidel nebo při zadávání konstant v desetinném tvaru, které je možné zadat přímo.

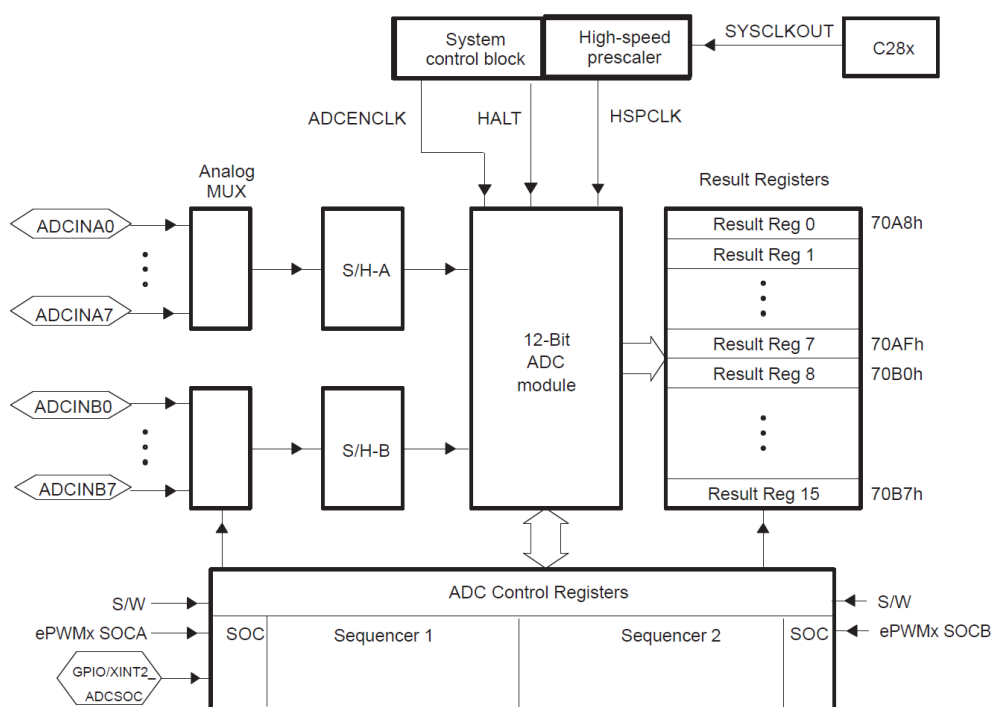
Specifikace procesoru:

- Frekvence jádra – 150 MHz (doba cyklu 6,67 ns),
- 32 bitová CPU – obsahuje float jednotu (IEEE-754) pro numerické výpočty s plovoucí řádovou čárkou,
- paměť na čipu – 256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM,
- boot ROM (8K x 16),
- 1 x 16 OTP ROM,
- PIE (Peripheral Interrupt Expansion) jednotka umožňuje 58 periferních vstupů přerušení,
- harwardská architektura sběrnic,
- 18 PWM výstupů z toho 6 HRPWM (High Resolution PWM) výstupů,
- 2 kvadratické dekodéry čidel otáček,
- 8 x 32 - bitových a 9 x 16 - bitových časovačů,
- 3 x 32 - bit CPU časovače
- 2 x CAN modul
- 3 x SCI (UART) moduly,
- 1 x SPI modul a 2 x McBSP moduly nastavitelné jako SPI,
- I2C komunikační sběrnice,
- 12. Bitový A/D převodník – 16 kanálový, podpora vnějšího i vnitřního přerušení,
- GPIO0 – GPIO63 je možné připojit na jeden z 8 externích zdrojů přerušení.

4.1.2 A/D převodník

Na obrázku 4.2 je znázorněna struktura A/D převodníku. ADC modul má 16 kanálů, které je možné konfigurovat jako dva samostatné 8 - kanálové moduly spouštěné např. ePWM. I když existuje více vstupních kanálů se dvěma sekvencery, procesor obsahuje jenom jeden AD

převodník. Prostřednictvím S/H obvodů, sekvencerů a analogového MUX obvodu možno převádět všech 16 vstupů postupně za sebou (kaskáda) nebo dva signály najednou při režimu 2 x 8 kanálů. Po převedení analogové hodnoty je výstupní číslo zapsáno do registru ADCRESULT.



Obr. 4.2 Bloková struktura A/D převodníku

Parametry A/D převodníku:

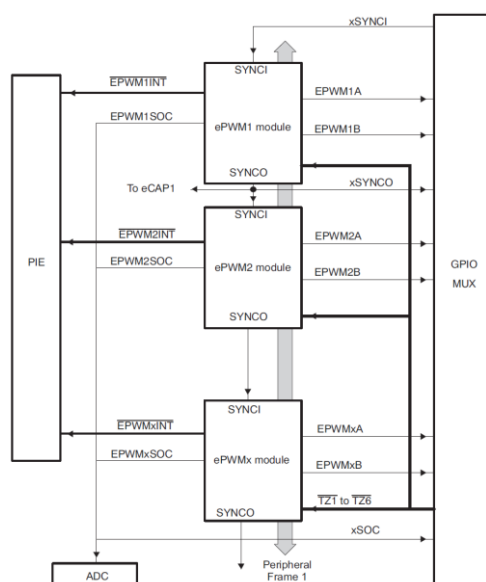
- Jeden 12-bitový A/D převodník s dvěma S/H obvody,
- simultánní nebo sekvenční vzorkování a převod hodnot,
- Vstupní hodnoty v rozsahu 0 - 3V,
- Rychlý převod s vzorkovací frekvencí 12,5 MHz, ADC hodiny, 6,25 MSPS,
- 16 multiplexovaných vstupních kanálů,
- 16 výstupných registrů pro uložení výstupní hodnoty konverze,
- Tři typy spouštění A/D převodu:
 - softwarové přerušení,
 - přerušení od ePWM 1-6,
 - přerušení od GPIO XINT2.

Výpočet výstupní hodnoty:

$$\begin{aligned}
 \text{digitální hodnota} &= 0 && \rightarrow && \text{když vstup je } \leq 0 \text{ V} \\
 \text{digitální hodnota} &= 4096 * \frac{V_{\text{vstupní analogová hodnota}} - \text{ADCLO}}{3} && \rightarrow && \text{když } 0 \text{ V} < \text{vstupní analogová hodnota} < 3 \text{ V} \\
 \text{digitální hodnota} &= 4095 && \rightarrow && \text{když vstup je } \geq 3 \text{ V}
 \end{aligned}$$

4.1.3 ePWM modulátor

Blok ePWM představuje kompletní PWM kanál, který je složen se dvou výstupů PWM: PWMxA a PWMxB. Obrázek 4.3 zobrazuje strukturu PWM jednotky. Každá úroveň PWM modulu je totožná.



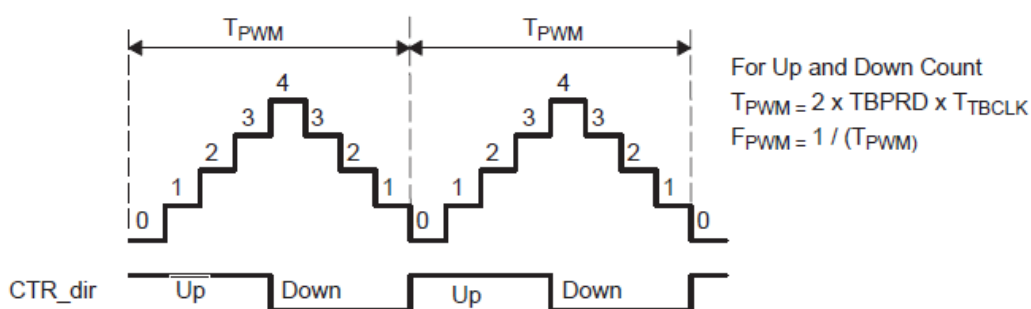
Obr. 4.3 Bloková struktura ePWM modulu

Tento procesor má ještě navíc hardwarové rozšíření v podobě HRPWM modulátoru. (*High Resolution PWM*), které umožňuje ještě preciznější ovládání PWM výstupů. PWM jednotky jsou číslovány od PWM1 – PWM6, přičemž každá je ještě rozdělena na dvě úrovně A – B. Tyto kombinace tvoří 12 PWM výstupů plus 6 HRPWM výstupů. PWM moduly jsou společně vázány synchronizačními hodinami. Jednotlivé moduly je také možné provozovat v módu „stand – alone“.

Každý modul ePWM obsahuje následující funkce:

- 16 – bitový čítač s nastavitelnou periodou a frekvencí
- podpora programovatelné fáze a doby neaktivních pulzů (tzv. deadtime)
- všechny události od PWM modulu můžou vyvolat přerušení CPU nebo start konverze A/D převodníku (EPWMxSOCA, EPWMxSOCB),
- Dvojitý PWM výstupy (PWMxA a PWMxB), které můžou být použity ve více režimech.

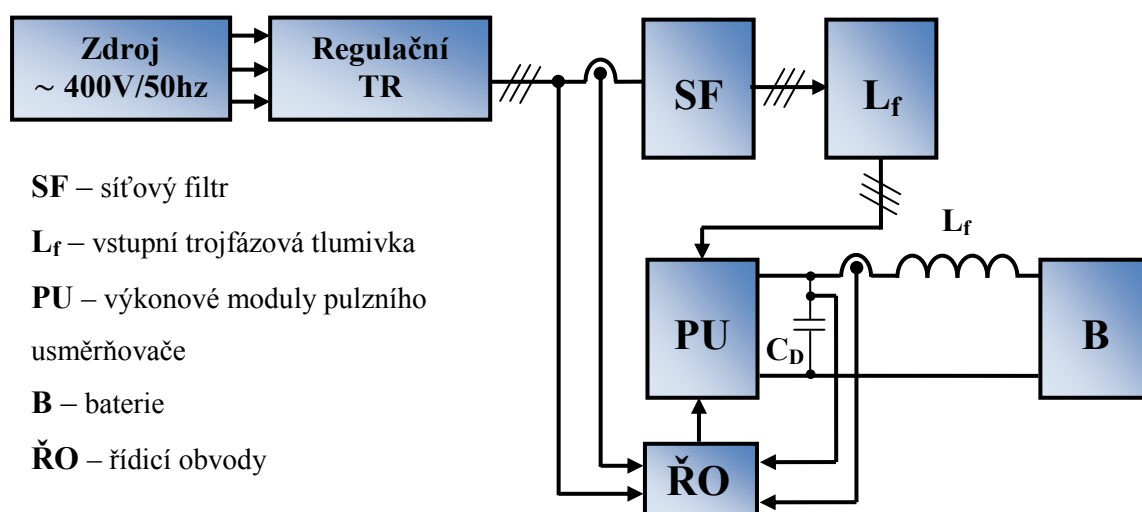
Frekvence PWM pulzů je řízená registrem TBPRD a módem čítače : up – down mód, up – mód, down-mód. Jak je vidět na obrázku 4.4 čas inkrementu hodnoty uložené v registru TBPRD je daný hodinami TBCLK, které jsou děličkou hodin odvozené od systémových hodin (SYSCLKOUT). Po přetečení nastavené hodnoty v registru periody je vygenerována změna úrovně pulzu PWM. Na obrázku je rovněž uveden vztah pro výpočet periody a frekvence PWM signálu. Pro řízení pulzního usměrňovače byl nastaven mód čítače znázorněný na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Up-down mód PWM čítače

5 Dimenzování výkonové části pulzního usměrňovače

Dále se práce bude zabývat dle zadání dimenzováním výkonové části pulzního usměrňovače. Na obrázku 5.1 je vidět blokové schéma výkonové části pulzního usměrňovače. Cíle této části je správně proudivě a tepelně nedimenzovat výkonové prvky pulzního usměrňovače a vybrat vhodné výkonové moduly od zvoleného výrobce pro parametry dle zadání. Podobně bude navrženo i jištění pulzního usměrňovače.



Obr 5.1 Bokové schéma výkonové části pulzního usměrňovače

Na vstupu je napájecí zdroj realizovaný třífázovým regulačním transformátorem. Napájecí napětí bude odvozeno od síťového napětí $230/400\text{ V}$. Snižujícím trojfázovým transformátorem se dosáhne hodnoty sduženého napětí $U_S = 230\text{ V}$ ($U_I = 132,8\text{ V}$). Toto snížené napětí je nutné pro správnou činnost pulzního usměrňovače, kdy hodnota napětí na výstupu (při vybité baterii je napětí $U_D < 350\text{ V}$) musí být větší než maximální hodnota napětí na vstupu ($U_{Smax.} = \sqrt{2} * U_S$).

5.1 Návrh výkonových spínacích prvků

Zadané parametry pro návrh výkonových prvků jsou:

$$U_D = 350\text{ V}, I_D = 20\text{ A}$$

Výpočet maximálního proudu:

$$P_{OUT} = U_D \cdot I_D = 350 \cdot 20 = 7\text{ kW} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Uvažujeme } P_{IN} = P_{OUT} = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos(\varphi) \rightarrow I_S &= \frac{P_{OUT}}{\sqrt{3} \cdot U_S \cdot \cos \varphi} = \\ &= \frac{7000}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 1} \cong \underline{\underline{17,6 \text{ A}}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$I_{Smax.} = \sqrt{2} \cdot I_S = \sqrt{2} \cdot 17,6 = \underline{\underline{24,9 \text{ A}}} \quad (5.3)$$

Dle zadaných hodnot a doporučení vedoucího diplomové práce volím bezpotenciálové IGBT moduly typu **SKM50GB123D (2xIGBT tranzistory s antiparalelní diodou)** s parametry [14]:

$$U_{CES} = 1200 \text{ V}$$

$$I_c = 50 \text{ A} \quad - \text{ při teplotě čipu } 125^\circ\text{C} \text{ a teplotě pouzdra } 25^\circ\text{C}$$

$$I_c = 40 \text{ A} \quad - \text{ při teplotě čipu } 125^\circ\text{C} \text{ a teplotě pouzdra } 80^\circ\text{C}$$

$$R_{th(J-C)T} = 0,4 \text{ K/W} \quad - \text{ tepelný odpor čip – pouzdro IGBT tranzistoru}$$

$$R_{th(J-C)D} = 0,7 \text{ K/W} \quad - \text{ tepelný odpor čip pouzdro zpětné diody}$$

$$T_{jmax.} = 150^\circ\text{C} \quad - \text{ maximální teplota čipu}$$

$$U_{CE} = 1 \text{ V} \quad - \text{ úbytek napětí mezi kolektorem a emitorem}$$

$$R_{CE} = 44 \text{ m}\Omega \quad - \text{ diferenciální propustný odpor IGBT tranzistoru}$$

$$t_{ON} = 70 \text{ ns} \quad - \text{ čas sepnutí tranzistoru}$$

$$t_{OFF} = 400 \text{ ns} \quad - \text{ čas vypnutí tranzistoru}$$

Ztrátový výkon pulzního usměrňovače ΔP_{TOT} pro proud tekoucí do zátěže $I_D = 20 \text{ A}$ je možno vyjádřit vztahem (5.4). [7]

$$\Delta P_{TOT} = 2 \cdot (U_{CE} \cdot I_D + I_D^2 \cdot R_{CE}) \cdot \left(\frac{-t_{ON} - t_{OFF} + \frac{1}{f_S}}{\frac{1}{f_S}} \right) + f_S \cdot \frac{3}{2} U_D \cdot I_D \cdot (t_{ON} + t_{OFF}) \quad (5.4)$$

$$\Delta P_{TOT} = 2 \cdot (1 \cdot 20 + 20^2 \cdot 44 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(\frac{-70 \cdot 10^{-9} - 400 \cdot 10^{-9} + \frac{1}{10000}}{\frac{1}{10000}} \right) +$$

$$+ 10000 \cdot \frac{3}{2} 350 \cdot 20 \cdot (70 \cdot 10^{-9} + 400 \cdot 10^{-9}) = 124,19 \text{ W} \rightarrow \underline{\underline{125 \text{ W}}} \quad (5.5)$$



Obr. 5.2 Vybraný IGBT modul v pouzdru Semitras 2

Přepočet maximálního vstupního proudu s uvažováním vypočtených ztrát:

$$P_{IN} = P_{OUT} + \Delta P_{TOT} = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S + \Delta P_{TOT} \rightarrow I_S = \frac{P_{OUT} + \Delta P_{TOT}}{\sqrt{3} \cdot U_S} =$$

$$= \frac{7000 + 125}{\sqrt{3} \cdot 230} \cong \underline{\underline{18 \text{ A}}} \quad (5.6)$$

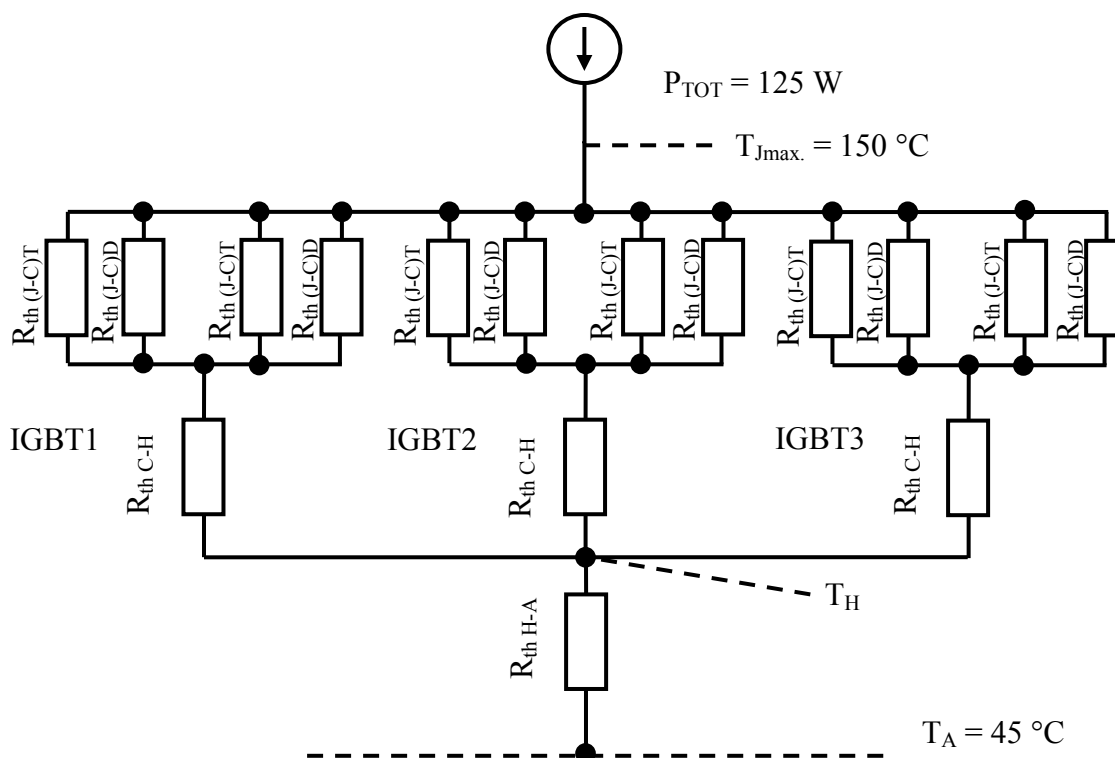
$$I_{Smax.} = \sqrt{2} \cdot I_S = \sqrt{2} \cdot 18 = \underline{\underline{25,5 \text{ A}}} \quad (5.7)$$

5.2 Výpočet chladiče

Celkový ztrátový výkon pulzního usměrňovače je $P_{TOT} = 125 \text{ W}$. Celkové tepelné schéma je vidět na obrázku 5.3. Celkový tepelný odpor tří IGBT modulů SKM50GB123D je dán vztahem:

$$R_{th(J-C)SKM50} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{(R_{th(J-C)T} \cdot R_{th(J-C)D})}{(R_{th(J-C)T} + R_{th(J-C)D})} + R_{th(C-H)}}{3} \quad (5.8)$$

$$R_{th(J-H)SKM50} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{(0,4 \cdot 0,7)}{(0,4 + 0,7)} + 0,005}{3} = \underline{\underline{0,0441 \text{ K/W}}} \quad (5.9)$$



Obr. 5.3 Tepelné schéma

$R_{th(J-C)}$ tepelný odpor přechodu čip – pouzdro

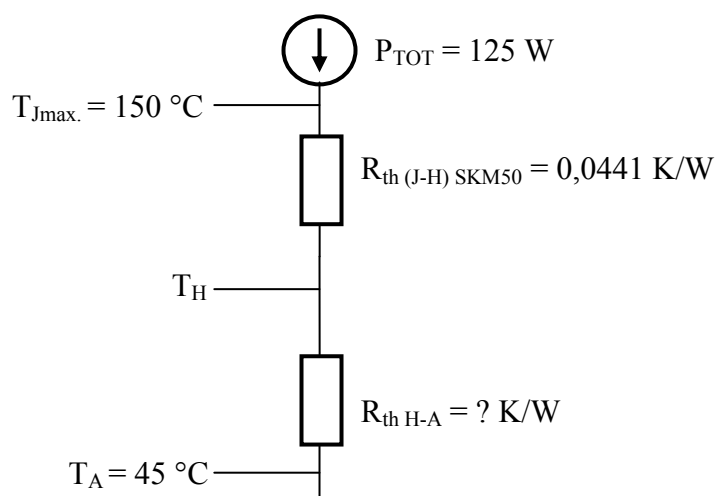
$R_{th(C-H)}$ tepelný odpor přechodu pouzdro – chladič (teplovodivá pasta)

Tepelné schéma po výpočtu dle vztahu (5.9) je vidět na obrázku 5.4. Tepelný odpor chladiče tedy bude:

$$\Delta T = P_{TOT} \cdot \sum R_{th} \quad (5.10)$$

$$T_J - T_A = P_{TOT} \cdot (R_{th J-H} + R_{th H-A}) \quad (5.11)$$

$$R_{th H-A} = \frac{T_J - T_A}{P_{TOT}} - (R_{th J-H}) = \frac{150 - 45}{125} - 0,0441 = \underline{\underline{0,7959 \text{ K/W}}} \quad (5.12)$$



Obr. 5.4 Tepelné schéma po přepočtu

Tomuto vyhovuje chladič **P3** firmy *Semikron* o délce 180 mm, s dodatečným chlazením ventilátorem **SKF 3-230-01**, který však může být spínán teplotním čidlem až při překročení teploty chladiče nad hodnotu 80°C.

$$R_{th (H-A)} = 0,36 \frac{K}{W} \text{ s ventilátorem } 0,120 K/W \quad (5.13)$$

Přepočet pro zvolený chladič: - přirozené chlazení:

a) maximální teplota čipu:

$$T_j = T_A + P_{TOT} \cdot (R_{th J-H} + R_{th H-A}) = 45 + 125 \cdot (0,0441 + 0,36) = \underline{\underline{95,5 \text{ } ^\circ\text{C}}} \quad (5.14)$$

b) maximální teplota chladiče:

$$T_H = T_A + (R_{th H-A} \cdot P_{TOT}) = 45 + (0,36 \cdot 125) = \underline{\underline{90 \text{ } ^\circ\text{C}}} \quad (5.15)$$

Nucené chlazení:

a) maximální teplota čipu:

$$T_j = T_a + P_{TOT} \cdot (R_{th J-C} + R_{th H-A}) = 45 + 125 \cdot (0,0441 + 0,120) = \underline{\underline{65,5 \text{ } ^\circ\text{C}}} \quad (5.16)$$

b) maximální teplota chladiče:

$$T_H = T_A + (R_{th\ H-A} \cdot P_{TOT}) = 45 + (0,120 \cdot 125) = \underline{60\ ^\circ\text{C}} \quad (5.17)$$

5.3 Jistění

Vyjdeme ze vztahu (5.17) pro maximální hodnotu vstupního proudu:

$$I_{Smax.} = \sqrt{2} \cdot I_S = \sqrt{2} \cdot 18 = \underline{25,5\ \text{A}} \quad (5.18)$$

Na tuhle hodnotu proudu dimenzujeme jistění vstupu, s ohledem na přípustný maximální proud zvolených IGBT tranzistorů.

Jistění pulzního usměrňovače je provedeno třemi válcovými pojistkami **PV514 32A** gR firmy OEZ a.s. na jmenovitý proud 32A. Tyto pojistky jsou zasunuty v pojistkovém odpojovači **OPV14S-3** téže firmy.

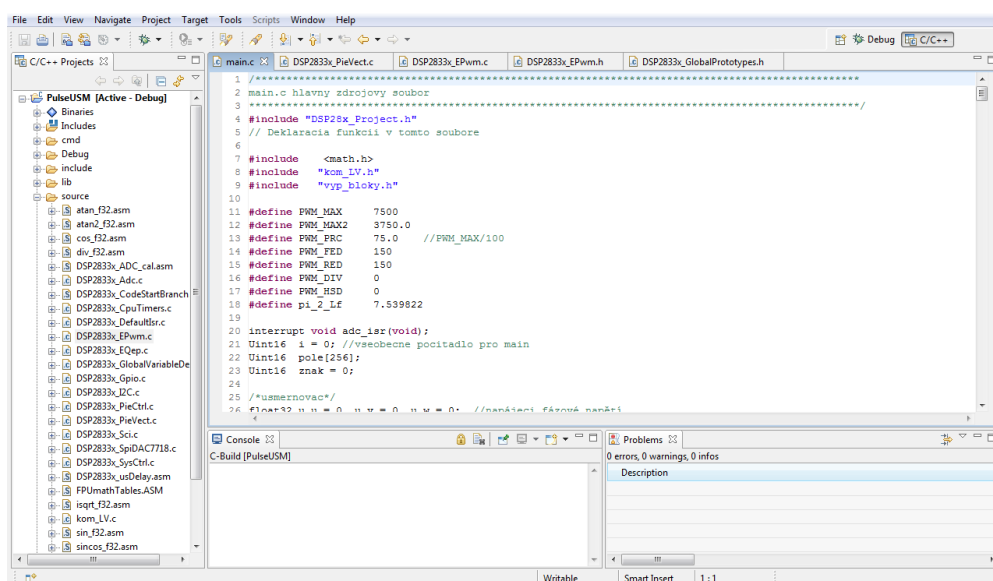
Kondenzátorová baterie C_D byla zvolena na hodnotu 1 mF, v provedení dvou sériově spojených kondenzátorů určených pro impulzní aplikace o hodnotě 2 mF a dimenzovány na jmenovité napětí 450V. Kondenzátory firmy DC Link jsou vybrány i s ohledem na jmenovitou proudovou zatížitelnost, dle aktuálního katalogu. Tyto hodnoty byly zvoleny i na základě zkušeností při navrhování měničů z katedry Elektroniky.

Propojení výkonových modulů je provedeno měděnými propojkami o průřezu 20 mm². Pro dané proudové zatížení je tento rozměr značně předimenzován, no pro vhodné konstrukční uspořádání je tento typ sběrnice výhodou. Navržené konstrukční uspořádání je vidět v příloze H.

6 Program pro řízení pulzního usměrňovače

6.1 Obecný popis

Navržený program pro řízení a komunikaci je v příloze A. Program vychází z již dostupných knihoven napsaných na katedře Elektroniky nebo přímo z knihoven, které jsou dostupné přímo na stránce výrobce DSP. Pro programování signálového procesoru a postupné odlaďování programu bylo použité vývojové prostředí přímo od výrobce procesoru - Code Composer Studio v.4 (obr. 6.1).



Obr. 6.1 Vývojové prostředí Code Composer Studio v.4

Jak je vidět v příloze, využívá se jedno přerušení od A/D převodníku, ve kterém jsou také vypočteny všechny potřebné veličiny a bloky z obrázku 3.8 a provedena regulace napětí a proudu meziobvodu.

6.2 Struktura programu

6.2.1 Deklarace funkcí

Jak je vidět v příloze A program je rozčleněn do tří částí. V první části jsou nastaveny počáteční hodnoty všech proměnných a požadované definice proměnných- deklarace funkcí. Všechny potřebné informace o nastaveních procesoru jsou k nalezení v manuálech k použitému signálovému procesoru (viz. Manuály a datové listy).

V této části jsou nastaveny i parametry PWM modulace. Dle obrázku 4.4 a podle nastavených hodnot v programu je frekvence PWM rovna:

$$T_{PWM} = 2 \cdot TBPRD \cdot T_{TBCLK} = 2 \cdot 7500 \cdot 150 \cdot 10^6 \quad (6.1)$$

$$f_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} = \frac{1}{14000 \cdot 150 \cdot 10^6} \cong 10 \text{ kHz} \quad (6.2)$$

Dále jsou nastaveny i doby neaktivních pulzů (tzv. „mrtvé doby“) a parametry všech požadovaných regulátorů prostřednictvím datových struktur *DATA_REG*.

6.2.2 Tělo programu

V tele programu jsou provedeny všechny inicializace potřebných periférií a využívaných bloků procesoru – *tabulka přerušení*, *ADC modul*, *PWM modul*, *PLL*, *WatchDog*, *Peripheral Clocks* atd. Pak je v této části provedeno vymazání pole *mean*, které se dále využívá k výpočtu střední hodnoty napětí a střední hodnoty proudu v meziobvodu. Také se počítá i střední hodnota napětí *u_s*, které vychází z vektorové analýzy:

$$u_s = \text{VektAn}(u_Alfa, u_Beta, \&u_sin, \&u_cos);$$

Toto napětí odpovídá maximální hodnotě vstupního fázového napětí, a dále se využívá jako podmínka v návrhu algoritmu zvolené nabíjecí charakteristiky. Rovněž se v této části inicializují PWM moduly ePWM1 – ePMW3.

Důležitou částí těla programu je komunikace s prostředím LabView, které je vidět v příloze F. V nekonečné smyčce *while* jsou prostřednictvím sériového portu SCI vyčítány a zapisovány různé důležité parametry a žádané hodnoty pulzního usměrňovače. Na komunikaci se využívá knihovna *SCI DSP2833xSCI.h* přímo od firmy Texas Instruments a knihovna *kom_LV.h*, vytvořena na katedře elektroniky.

Nejdůležitější částí v těle programu je však algoritmus nabíjecí charakteristiky. Byla aplikována a použita charakteristika *IUIa*, která je k olověným akumulátorům nejšetnější a časově nejrychlejší nabíjecí charakteristikou. Kromě samotného algoritmu nabíjecí charakteristiky jsou zde ošetřeny i různé stavy zadávané z *LabView*, jako je požadavek pro rekuperaci energie do sítě (*idi = -id*) nebo zpětná reakce vypnutí pulzů v *LabView* při ukončení nabíjení (*vypnuti_pulzu_LV = 0(1)*) - viz. kap. 6.3.

6.2.3 Přerušení od A/D převodníku

Poslední částí programu je přerušení od A/D převodníku:

```
interrupt void adc_isr(void)
```

V této části je nejdříve prováděn A/D převod všech potřebných vstupních a výstupních veličin. S výhodou je zde využívána float jednotka procesoru. Číselná hodnota, která je zapsána do ADCRESULT registru je přímo vynásobena desetinným číslem pro získání reálné hodnoty požadované veličiny. Tyto hodnoty se dále zpracovávají v následujících blocích: *transformace T3/2, vektorové rotace, vektorová analýza, zpětné rotace, a regulace činné a imaginární složky proudu*. Žádaná hodnota jalového proudu I_{qz} je udržována na nulové hodnotě pro dosažení maximálního účinku.

Dále je zde zajištěna ochrana pulzního usměrňovače pomocí omezovačů modulačních fázových napětí U_u , U_v , U_w :

```
if( $U_u > I$ )
{
     $U_u = I$ ;
}
else if( $U_u < -I$ )
{
     $U_u = -I$ ;
}
```

Následně se pomocí těchto vypočtených napětí generují požadované PWM pulzy.

Pak následuje regulace napětí v meziobvodu a regulace nabíjecího proudu. Pro regulaci napětí v meziobvodu je nutno počítat střední hodnotu změřeného napětí U_d . Rovněž se zde počítá i střední hodnota napětí u_s a střední hodnota proudu I_d . Následně je provedena regulace napětí meziobvodu:

```
 $I_{dz} = \text{Reg\_PI}(U_{dzi}, (\text{float32})U_{di}, \&U_{d\_reg});$ 
```


Jak je vidět napětový regulátor je řešen jako nadřazený regulátor s podřízenou smyčkou proudu, když akční hodnota vycházející z napětového regulátoru je v dalším cyklu regulace zapsána jako žádaná hodnota činného proudu regulátoru činného proudu.

Jak je vidět v příloze A regulace napětí a proudu v meziobvodu je prováděna po každém přetečení interního čítače. Hodnota čítače je nastavena na hodnotu 10. Po každém přerušení od A/D převodníku se jeho hodnota inkrementuje o 1. Tím je napětová regulace 10x pomalejší jako regulace činného proudu, což je vzhledem k tak pomalé soustavě jakou baterie bezpochyby je, dostatečně postačující.

Mimo regulaci napětí meziobvodu je v přerušení řešená i regulace nabíjecího proudu. Tato regulace je provedena přes integrační regulátor, pomocí kterého se nastavuje proudová rampa po které postupně roste výstupní proud na požadovanou hodnotu. Tím po spuštění nabíjení nedochází k nárazovému nárůstu nabíjecího proudu:

```
if(stop_reg_I == 1) //ošetření integrace regulátoru
{
    Ud_reg.Om = Reg_I(idi, Id, &Id_reg);
}

else
{
    Ud_reg.Om = 1;
}
```

Vzhledem k vlastnosti akumulátorů a jich malého vstupního odporu je možno nabíjecí proud regulovat pomocí omezení napětového regulátoru. Pokud bude napětí baterie větší než maximální vstupní usměrňená hodnota napětí (podmínka fungování pulzního usměrňovače), je zřejmé, že skutečná hodnota napětí v meziobvodu je rovna napětí na baterii. Po nastavení žádané hodnoty napětí na vyšší, výrobcem baterie doporučené nabíjecí napětí, není možné dosáhnout žádané hodnoty okamžitě, a proto se nastaví na své zadané omezení. Pak tedy regulátor proudu (omezení) *Reg_I* nastaví takovou hodnotu omezení napětového regulátoru (*Ud_reg.Om*), a posléze i hodnotu činného proudu (*I_dz*) dokud nabíjecí proud nebude roven žádané hodnotě proudu (*idi*), dané dle nabíjecí charakteristiky. Pomocné proměnné *Udi*, *idi* a *Udzi* slouží pro logiku nastavování žádaných hodnot při různém uživatelském přístupu v prostředí *LabView*.

Podmínka *if* slouží již jenom pro spuštění regulátoru se startem PWM pulzů. Na konci napěťové a proudové regulace je nulován interní čítač do výchozího nulového stavu. Přerušení od A/D převodníku pak zakončují příkazy pro vymazání příznaků přerušení, a nastavení funkčních bitů pro ovládání LED signálů na vývojovém kitu.

6.3 Algoritmus nabíjecí charakteristiky IU1a

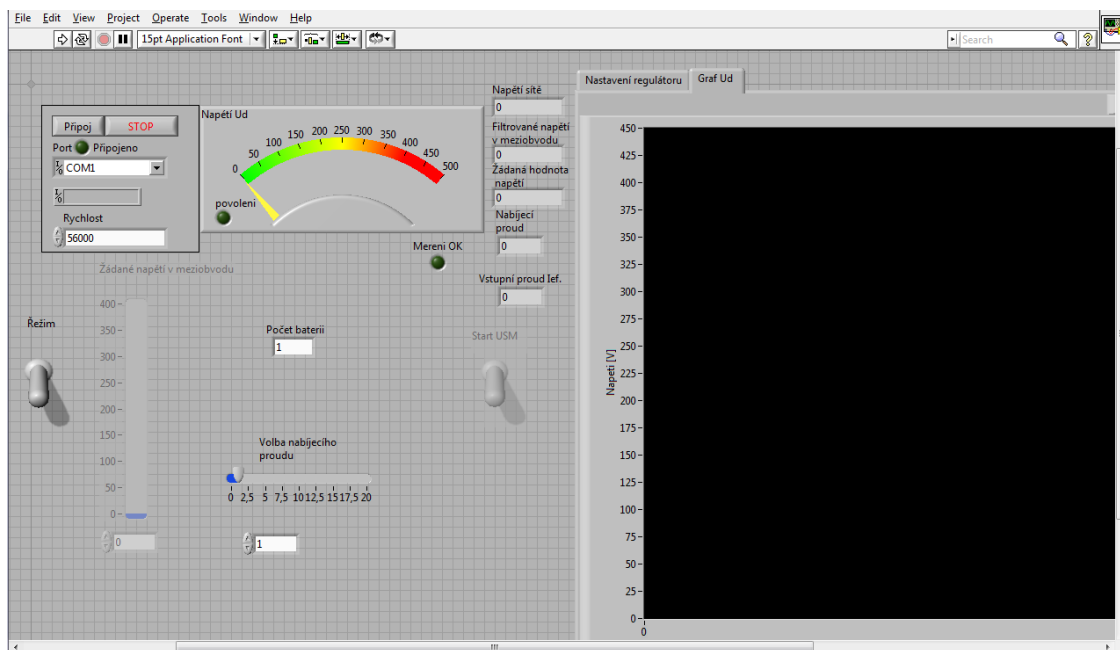
V příloze B je zobrazen vývojový diagram algoritmu nabíjecí charakteristiky. První podmínka *režim* určuje, zda se bude baterie nabíjet nebo vybíjet. Pokud se proměnná *režim* = 0 vykonají se dále následující příkazy. Pokud podmínka není splněna, nastaví se žádaná hodnota proudu v meziobvodu na zápornou hodnotu a je možné baterii vybíjet. Nabíjecí proud změni směr, což podle vektorového diagramu z obrázku 3.7 obrátí směr toku proudu a tím pádem i výkonu zpět do sítě. Baterie se bude vybíjet. Podle velikosti vstupního napětí bude téct do sítě větší nebo menší proud.

Příkazy, které následují po první podmínce zadávané z *LabView* řeší samotnou nabíjecí charakteristiku. Napětí na baterii se postupně dorovnáva žádané hodnotě napětí v meziobvodu a baterie se v této fázi nabíjí konstantním proudem (**I**). Po dosažení žádané hodnoty klesá nabíjecí proud a regulátor se snaží udržet napětí na konstantní hodnotě (nabíjení konstantním napětím **U**) proto postupně klesá proud. Při poklesu nabíjecího proudu pod 2,8 A se žádaná hodnota napětí zvětší o přírůstek ($U_{dz} * 1,041667$), což odpovídá zplynovacímu napětí baterie. Opět začíná nabíjení konstantním proudem (**I**) do zplynovacího napětí. Po dosažení žádaného napětí klesá proud. Při poklesu pod 2 A dochází k vypnutí nabíjení (**a**) – vypnutí PWM pulzů.

6.4 Ovládací rozhraní pulzního usměrňovače v prostředí LabView

Jak je vidět na obrázku 6.2 ovládací panel je vytvořený v prostředí *LabView*. Prostřednictvím tohoto panelu se zadávají parametry regulátorů, povolují spínací pulzy, nastavuje počet nabíjených baterií, a volí režim pulzního usměrňovače. Při povolení rekuperačního režimu je možné také nastavit žádanou hodnotu napětí v meziobvodu. Kromě základních ovládacích funkcí byly řešeny i dílčí logické funkce, jako například: po zvolení počtu baterií a povolení pulzů „volba baterií“ zašedne a nebude aktivní. Podobně je ošetřeno hlídání výstupního napětí a porovnávání s vektorem napětí u_s . Pokud bude napětí na vstupu vyšší než napětí na výstupu, nebude možno spustit pulzní usměrňovač, přesněji pulzy *PWM* apod. Rovněž po spuštění programu je nutno nejdřív zvolit port a připojit komunikační kanál.

Grafy vykreslují žádanou hodnotu napětí v meziobvodu U_{dzi} , vektor vstupního napětí u_s , skutečnou hodnotu napětí v meziobvodu $u_{d_{av}}$, nabíjecí proud $i_{d_{av}}$ a velikost vstupního proudu I_L , přesněji omezení napěťového regulátoru $U_{d_{reg.Om}}$. Tato hodnota při klesajícím nabíjecím proudu ve druhé fázi nabíjení stoupá na maximum (maximální omezení).



Obr. 6.2 Ovládací prostředí v LabView

7 Ověření funkčnosti navrženého algoritmu

Navržený algoritmus byl také ověřen na modelu nabíječe, který bylo pro odzkoušení nutné sestavit. Sestavený nabíječ je vyfocen v *příloze I*. Tento pulzní usměrňovač byl přizpůsoben pro požadované použití z měniče dostupného na katedře Elektroniky.

Mimo požadované konstrukční přizpůsobení bylo nutno vytvořit nové pospojování IGBT modulů a připojení kondenzátorové baterie. Pospojování IGBT modulů bylo provedeno měděnými pásky o průřezu $S = 20 \text{ mm}^2$ ($2 \times 10 \text{ mm}$). Připojení baterie přes měděné vodiče o průřezu $S = 2,5 \text{ mm}^2$.

Dále byly vytvořeny desky čidel napětí a proudu (*příloha E*). Tyto čidla jsou navrženy dle datových listů výrobců (viz. Manuály a datové listy). Jako čidla napětí jsou použita čidla firmy **LEM LV25-P** a jako čidla proudu jsou použity **LEM LA55-P**. Čidla proudu jsou na požadavek vedoucího práce na vyšší proudy. Proto pro snížení rozsahu jsou provedeny přes každé proudové čidlo 4 smyčky vodiče dané fáze. Tím se rozsah snížil z 50 A na hodnotu 12,5 A.

Dále byly provedeny veškeré kabeláže pro připojení baterie, pro připojení PWM pulzů z DSP, přívodní kabeláž, připojení tlumivek a pro připojení výstupů z čidel. Pro komunikaci přes sériovou linku SCI byl vyroben převodník USB→RS232 (*příloha D*).

7.1 Dosažené výsledky – ověření nabíjecí charakteristiky

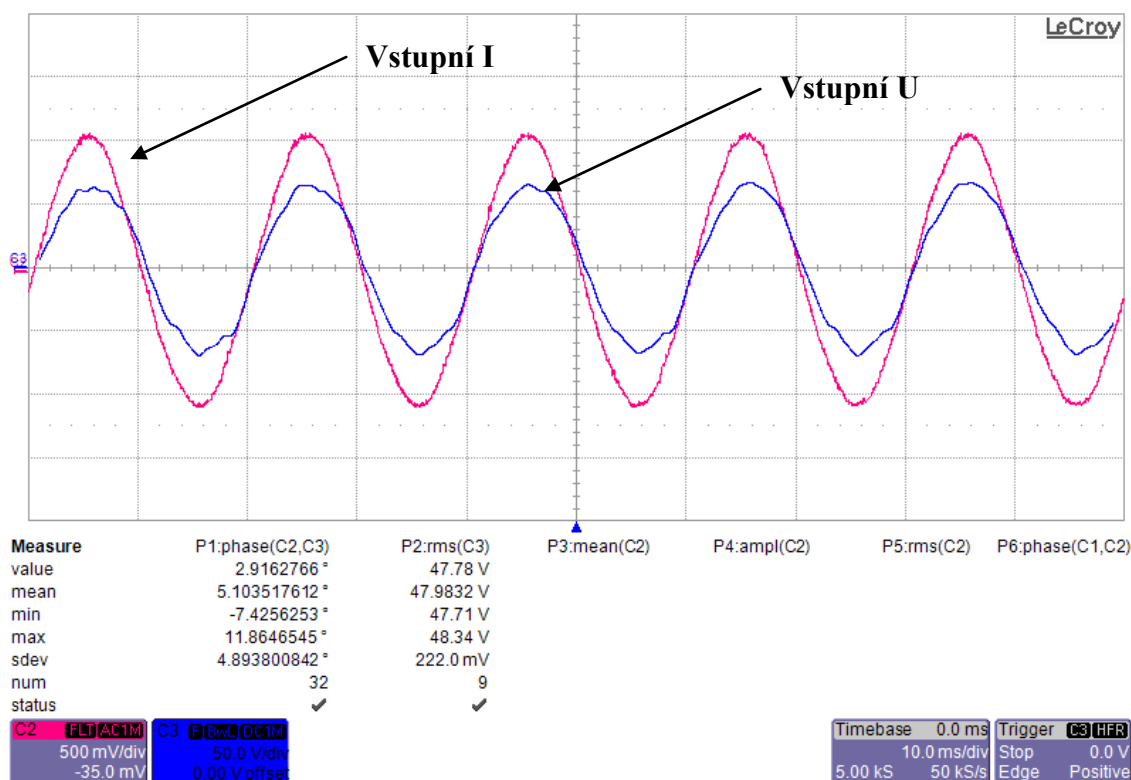
V *příloze C* je vyneseno graf nabíjecí charakteristiky, které se dosáhlo použitím navrženého algoritmu. Protože nebyla celá baterie v laboratoři aktuálně rovnoměrně nabita, bylo nabíjeno nejdříve 12 baterií (12 V) značky VARTA Hobby- každá o kapacitě 50 Ah (*příloha I*). Pro ověření algoritmu nabíjení jsou tyto podmínky samozřejmě postačující. Jak je vidět z grafu, v první části dochází k nabíjení konstantním proudem na hodnotu napětí ($U_{\text{nab.}} = 14,4 \times 12 = 172,8 \text{ V}$) dané výrobcem baterie VARTA. Po dosažení tohoto napětí se nabíjí konstantním proudem a v poslední fázi opět konstantním proudem na hodnotu plynovacího napětí $U_{\text{nab.}} = 12 \times 15 \text{ V} = 180 \text{ V}$. Nakonec je nabíjení automaticky odpojeno. Nabíjecí proud je v první fázi podle nabíjecí charakteristiky a principů nabíjení z kapitoly 2 nejdříve desetinový a ve druhé fázi pak polovina z nabíjecího proudu:

$$I_{D1} = 5 \text{ A}, I_{D2} = 2,5 \text{ A} \quad (7.1)$$

7.2 Průběhy vstupních a výstupních veličin

Při nabíjení akumulátorů byl rovněž kladen důraz na průběhy vstupních a výstupních veličin. V příloze G jsou uvedeny všechny průběhy vstupních i výstupních veličin pro různé nabíjecí cykly a stavy nabíjení i vybíjení. Také je zde porovnání vstupních veličin s běžným 6 - pulzním řízeným usměrňovačem.

Jak je vidět v příloze G vstupní napětí je značně rušeno vlivem spínání. Při použití vyšší vstupní indukčnosti je toto napětí více vyhlazené. Naopak při příliš vysoké vstupní indukčnosti není možné z principu na výstupu dosáhnout požadované proudové úrovně (vyšší indukčnost \rightarrow vyšší vstupní reaktance). Proto je nutno tuto indukčnost volit tak, aby bylo dosaženo požadovaného proudu na výstupu i vstupu a zároveň přijatelné zvlnění vstupního napětí.



Obr. 7.1 Vstupní proud a napětí při nabíjení 12 baterií proudem $I_D = 5 \text{ A}$

Obrázek 7.1 ukazuje průběhy vstupních veličin (napětí – modrý a proudu - červený) jedné fáze při nabíjení 12 baterií proudem $I_D = 5 \text{ A}$. Na průběh napětí je aplikován digitální filtr o velikosti 2 bity. Je vidět, že je dosaženo v podstatě sinusového vstupního proudu a velmi dobrého účinníku, který je roven (z obrázku 7.1):

$$\cos 5,10^\circ = 0,996 \quad (7.2)$$

V tabulce 7.1 jsou změřené (měřicím přístrojem LEM NORMA D6000) efektivní hodnoty vstupních proudů, vstupních napětí a výkonů v jednotlivých fázích 3 - f pulzního usměrňovače, při nabíjení 12 baterií (172,8 V) proudem $I_D = 5$ A. Tomu se rovná výkon:

$$P_{OUT} = U_D \cdot I_D = 172,8 \cdot 5 = \underline{864 \text{ W}} \quad (7.3)$$

Jak je vidět při nabíjení jsou výkony kladné a ve fázích tečou proudy vyšší než je proud na výstupu. Výkon na výstupu je menší o ztráty. Proud je ovlivňován vstupní tlumivkou, zdvihem napětí, které musí pulzní usměrňovač zajistit na výstupu z nižšího vstupního napětí a vznikajícími ztrátami.

Při vybíjení je výkon v jednotlivých fázích záporný. I když se vybíjí stejným proudem, proud na výstupu v jednotlivých fázích je nižší. Tady vstupují ztráty v usměrňovači, a také vysoké vstupní protinapětí. Při snížení tohoto napětí se vstupní proud zvýší – vychází z obrázku 3.6.

	Nabíjení	Vybíjení
I_1 [A]	6,38	4,31
U_1 [V]	54,10	54,45
I_2 [A]	6,27	4,53
U_2 [V]	54,40	54,26
I_3 [A]	6,47	4,17
U_3 [V]	54,06	54,06
P_1 [W]	306,3	-226,4
P_2 [W]	315,6	-238,1
P_3 [W]	326,4	-218,1
P [W]	948,3	-682,7

Tab. 7.1 Proudové, napěťové a výkonové poměry při nabíjení a vybíjení 12 baterií proudem $I_D = 5$ A

8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout vhodný algoritmus pro řízení pulzního usměrňovače jako nabíječe olověných akumulátorů. Z jednotlivých grafů v přílohách C a G je zřejmé, že bylo dosaženo požadovaného chování měniče. Od vynikajícího účinníku, až po sinusové průběhy vstupních proudů. Výrazný rozdíl ve tvaru vstupních proudů je možno vidět na porovnání průběhů z běžného 6 - pulzního řízeného usměrňovače. Tyto průběhy by byly nepřijatelné pro nabíjení vyššími výkony.

Nabíjení akumulátorů je provedeno na principu znaků plného nabití. Plynovací napětí se nemění, klesá nabíjecí proud a baterie rovnoměrně plynoují. Algoritmus byl zkoušen nejdříve na dvanácti bateriích a následně bylo nabíjeno ostatních 15 baterií. Samozřejmě jak je vidět v příloze G algoritmus byl odzkoušen i na celé baterii o jmenovitém napětí 350 (27 baterií). Nabíjecí čas 12 baterií byl přibližně 4,5 hodiny nabíjecím proudem $I_D = 5 \text{ A}$. Samozřejmě baterie možno vybit maximálně do 80% C_N (Ah) [2] což následně odpovídá i nabíjecímu času. Samozřejmě pro urychlení nabíjení je možné zvýšit nabíjecí proud na vyšší hodnotu: $0,2C_N$, $0,3C_N$ a pod.

Samotné oživování proběhlo bez větších problémů a výraznější potíže jsem musel řešit jen s komunikací přes RS232. Tady jsem musel najít ten nejvhodnější převodník, který by byl podporovaný i novějšími operačními systémy.

Samotný nabíjecí algoritmus je samozřejmě také možné dále upravovat a vylepšovat. Každý software je charakteristický svými aktualizacemi a vylepšeními, kterými je možné toto zařízení neustále zdokonalovat. Inovace by dále mohla spočívat například v monitorování nabíjecího času nebo v zjišťování dodaného náboje v Ah.

Současně je možná i inovace prostředí *LabView*, kde je například ještě prostor pro větší z univerzálnosti ovládání, kdy bude stačit zadat jenom počet nabíjených baterií a jejich kapacitu. Pro laboratorní účely se ale jevílo jako nejvhodnější ponechat volbu nabíjecího proudu pro uživatele. Rovněž je do komunikačního prostředí možno zakomponovat vykreslování více parametrů a veličin, nebo ovlivňování např. volby konečného plynovacího napětí, které je v této fázi řešení jen přes univerzální konstantu, apod.

Použitá literatura:

- [1] Vondrášek, František. *Výkonová elektronika- svazek 3*. Západočeská univerzita v Plzni, 2003, 267 s. ISBN 80-7082-980-X.
- [2] Cenek, Miroslav a kol. *Akumulátory od principu k praxi*. FCC PUBLIC, 2003, 248s. ISBN 80-86534-03-0.
- [3] Sobek, Martin. Teze- Výzkum vlastností střídavých strojů v generátorickém režimu.
- [4] *Three-phase controlled rectifiers*. [cit. 28.2.2011]
URL: <<http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/21.pdf>>
- [5] Arendáš, M., Ručka, M. *Nabíječky a nabíjení*. INGARA a BEN, Praha 1995, 126 s.
- [6] Šaloun, Petr. *Programovací jazyk C pro zelenáče*. Neokortex, 1999, 208 s. ISBN 80-86330- 02-X.
- [7] *Analysis of Losses In The Power Indirect Converters* [online], [cit. 7.12.2010], poslední revize 16.6.2010.
Dostupné z <<http://www.vabo.cz/stranky/STO9/sbornik/clanky/>>
URL: <http://www.vabo.cz/stranky/STO9/sbornik/clanky/Jan_Leuchter1.pdf>
- [8] *Simulation of Three-phase Voltage Source PWM Rectifier Based on Direct Current Control* [online], [cit. 24.4.2011], poslední revize 16.7.2008.
Dostupné z <<http://ieeexplore.ieee.org>>
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4566815>

Manuály a datové listy:

- [9] TMS320f28335 Data manual,
Manuály a návody dostupné z: <<http://www.ti.com>>
URL: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tms320f28335.html>>
- [10] LEM Voltage Transducer LV25-P.pdf – napětíové čidla
- [11] LEM Current Transducer LA55-P.pdf – proudové čidla
- [12] Quadruple Operational Amplifiers LM348.pdf – operační zesilovač pro převod úrovní A/D
- [13] DS_FT232R.pdf – datový list k převodníku USB to RS232
- [14] SKM50GB123D_22890002.pdf – IGBT tranzistor firmy SEMIKRON

Seznam příloh:

Příloha:

- A *Program pro řízení pulzního usměrňovače*
- B *Obr. 1: Vývojový diagram nabíjecí charakteristiky IU1a*
- C *Graf č. 1: Změřena nabíjecí charakteristika IU1a*
- D *Obr. 1: Převodník USB → RS232- DPS*
Obr. 2: Převodník USB → RS232 – realizovaný převodník
- E *Obr. 1: Deska proudových čidel*
Obr. 2: Deska napěťových čidel
- F *Obr. 1: Ovládací prostředí LabView - nabíjení 12 baterií v druhé fázi nabíjení (konstantním U)*
- G *Obr. 1: Výstupní napětí U_D (modrý) a proud I_D (žlutý) při nabíjení 12 baterií*
Obr. 2: Výstupní napětí U_D (modrý) a proud I_D (žlutý) při vybíjení 12 baterií proudem 5 A
Obr. 3: Vstupní napětí U_1 (modrý) a proud I_1 (červený) při vybíjení 12 baterií proudem 5 A
Obr. 4: Výstupní proud I_D při nabíjení celé baterie proudem 5 A
Obr. 5: Výstupní proud I_D při vybíjení celé baterie proudem 3 A
Obr. 6: Vstupní napětí U_1 (modrý) a proud I_1 (červený) při nabíjení celé baterie proudem 5 A – napětí bez digitálního filtru
Obr. 7: Vstupní napětí U_1 (modrý) a proud I_1 (červený) při vybíjení proudem 5 A – napětí bez digitálního filtru
Obr. 8: Napětí a proud plně otevřeného 6- pulzního řízeného usměrňovače
- H *Obr. 1: Navržené konstrukční uspořádání – rozmístění součástí*
Obr. 2: Konstrukční uspořádání - vnější provedení
- I *Obr. 1: Sestavený pulzní usměrňovač pro odzkoušení řídicího algoritmu pohled 1*
Obr. 2: Nabíjené baterie
Obr. 3: Sestavený pulzní usměrňovač pro odzkoušení řídicího algoritmu pohled 2